



MALAMA-HANKKEEN TULOKSET

Turun yliopisto

Turun kauppakorkeakoulu, Porin yksikkö

Teknillinen tiedekunta, kone- ja materiaalitekniikan laitos

2025

Heidi Piili

Kirsi Laitio

Elisa Aro



Euroopan unionin
osarahoittama



SATAKUNTALIITTO
Regional Council of Satakunta



TURUN
YLIOPISTO

Raportin julkaisija

MALAMA-kehittämishanke (1.5.2023–31.8.2025)

Hankkeen koodi A80056

MALAMA-investointihanke (1.5.2023–31.4.2025)

Hankkeen koodi A80057

Turun yliopisto

Turun kauppakorkeakoulu, Porin yksikkö

Teknillinen tiedekunta, Kone- ja materiaalitekniikan laitos

Projektin nettisivu: <https://sites.utu.fi/malama/>

Kannen kuva: Canva Pro

Julkaistu 29.8.2025

Tämä raportti pohjautuu hankkeen aikana tuotettuihin selvityksiin, raportteihin ja muuhun aineistoon, jotka ovat tuottaneet hankkeessa mukana olleet asiantuntijat Elisa Aro, Anna Huusko, Olivia Iizuka, Nikhil Kamboj, Päivikki Kuoppakangas, Kirsi Laitio, Heidi Piili, Kristina Tarson, Eter Tourunen, Satu Tähtinen, Eetu Valtonen ja Inka Väisänen.

MALAMA-hankkeessa on saatavilla myös raportit:

Aro Elisa, Piili Heidi, Laitio Kirsi, Kamboj Nikhil, Väisänen Inka, Tourunen Eter, Tarson Kristina, Valtonen Eetu, Tähtinen Satu & Huusko Anna. 2025. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien sekä laserpuhdistusteknologian nykytila-analyysi (työpaketti 2).

Aro Elisa & Kamboj Nikhil. 2025. Laserteknologian investoinnin arviointi – Lasерpuhdistus meriteollisuudessa ja lasermerkkaus pakkausteollisuudessa (työpaketti 5).

Julkaisun sisältö vastaa kirjoittajien näkemyksiä eikä välttämättä edusta rahoittajien näkemyksiä asiasta.

Saatteeksi

Maalatun ja maalattavan pinnan esivalmistelu laserteknologialla Marine-kontekstissa (MALAMA) -kehittämishanke (hankekoodi A80056) on suunniteltu laivanrakennusteollisuuden pintojen edistyneen esikäsittelyn tarpeeseen. Hanke selvittää laserpuhdistustekniikan mahdollisuuksia taloudellisuuden ja ympäristön kannalta sekä edistää tekniikan saamista laivanrakennuksen ja pakkausteollisuuden käyttöön. Hankkeen toteutusaika on 1.5.2023–31.8.2025. Hankkeen rinnalla on toteutettu MALAMA-investointihanketta (hankekoodi A80057), jonka avulla hankittua laserpuhdistuslaitteistoa on osin hyödynnetty raportoiduissa laboratoriotesteissä. Investointihankkeen toteutusaika on 1.5.2023–30.4.2025.

MALAMA-hanke on jaettu kuuteen eri työpakettiin, joissa saavutetut tulokset julkaistaan tässä raportissa. Hankkeessa on julkaistu erilliset, syvällisemmin työpakettien 2 ja 5 analyysiin ja tuloksiin perehtyvät raportit. Tämä raportti on kirjoitettu hanketoteuttajien keskinäisessä yhteistyössä.

Tietoa hankkeesta, sen toimenpiteistä, tapahtumista sekä tuloksista on avoimesti saatavilla hankkeen verkkosivuilla <https://sites.utu.fi/malama/>.

MALAMA-hanke on Euroopan unionin osarahoittama hanke, jonka toteuttajana on Turun yliopiston kauppa-
korkeakoulun Porin yksikkö yhteistyössä Turussa sijaitsevan kone- ja materiaalitekniikan laitoksen kanssa. Haluamme kiittää hankkeen rahoitusviranomasta Satakuntaliittoa rahoituksesta ja sen tarjoamasta tuesta hankkeen aikana sekä hankkeen ohjausryhmää sen pitkäjänteisestä tuesta ja ohjauksesta hankkeen toteutuksessa. Erityiskiitoksen haluamme osoittaa kaikille hankkeen toimenpiteisiin osallistuneille yrityksille, joita ilman emme olisi saaneet arvokkaita käytännön kokemuksia ja näkökulmia.

Tiivistelmä

MALAMA-kehittämishankkeen tavoitteena oli muodostaa kokonaiskuva laserteknologian ja perinteisten raepuhallusmenetelmien soveltuvuudesta laivanrakennuksen kontekstissa, erityisesti taloudellisten ja ympäristöllisten näkökulmien osalta. Laserpuhdistusteknologian osalta pyrittiin arvioimaan menetelmän toimivuutta sekä laboratorio-olosuhteissa että todellisessa teollisessa ympäristössä, ja tarkastella sen kustannus-hyötysuhdetta ja ympäristökuormitusta.

Tavoitteet saavutettiin kattavasti. Laserteknologiaa testattiin monipuolisesti eri työpaketeissa: laboratorioissa, simuloituissa olosuhteissa ja telakaympäristössä. Sprinttijaksoissa eli nopeissa kokeiluissa Turussa ja Raumalla testattiin yritysten toimittamia materiaaleja, ja tulokset osoittivat laserpuhdistuksen soveltuvuuden erityisesti tarkkuutta vaativiin kohteisiin. Menetelmä osoittautui tehokkaaksi, kemikaalittomaksi ja pölytöntä työympäristöä tukevaksi vaihtoehdoksi.

Laserpuhdistuksen vaikutuksia arvioitiin muun muassa pintakarheusmittauksilla, korroosiotesteillä ja topografiakuvantamisella. Tulokset osoittivat, että laserkiillotus paransi pintojen tasaisuutta ja korroosionkestävyyttä merkittävästi. Menetelmä säilytti materiaalien rakenteellisen eheyden ja soveltui monimateriaali-liitoksiin, mikä tukee sen käyttöä vaativissa tuotantoympäristöissä.

Hankkeessa saatujen tulosten mukaan laserlaitteiston alkuinvestointi on edelleen kalliimpi kuin perinteisten menetelmien, mutta pidemmällä aikavälillä kustannussäästöjä voi syntyä esimerkiksi kemikaalien, hiekan ja jätteenkäsittelyn vähentyessä. Kehitetty viitekehys ja laskentamalli tukevat yrityksiä investointipäätöksissä ja teknologian käyttöönotossa. Laserpuhdistus vähentää merkittävästi kemikaalien ja hiekan käyttöä sekä vähentää jätteen määrää, mikä tukee kestävä kehityksen tavoitteita.

Yhteistyö yritysten, tutkimuslaitosten ja rahoittajan välillä mahdollisti osaamisen jakamisen ja teknologian kehittämisen. MALAMA-hankkeen tulokset vahvistavat, että laserpuhdistus on lupaava, turvallinen ja ympäristöystävällinen ratkaisu teollisiin pintakäsittelyprosesseihin.

Abstract

The aim of the MALAMA development project was to form an overall picture of the suitability of laser technology and traditional abrasive blasting methods in the context of shipbuilding, particularly from an economic and environmental perspective. With regard to laser cleaning technology, the aim was to evaluate the effectiveness of the method both in laboratory conditions and in a real industrial environment, and to examine its cost-effectiveness and environmental impact.

The objectives were achieved comprehensively. Laser technology was tested extensively in different work packages: in laboratories, simulated conditions, and shipyard environments. In sprint phases, i.e., rapid experiments in Turku and Rauma, materials supplied by companies were tested, and the results showed that laser cleaning is particularly suitable for applications requiring precision. The method proved to be an effective, chemical-free, and dust-free alternative that supports a healthy working environment.

The effects of laser cleaning were evaluated using surface roughness measurements, corrosion tests, and topography imaging, among other methods. The results showed that laser polishing significantly improved surface smoothness and corrosion resistance. The method preserved the structural integrity of the materials and was suitable for multi-material joints, which supports its use in demanding production environments.

The results further indicated that the acquisition cost of laser equipment is still more expensive than that of traditional methods, but in the long-term cost savings can be achieved, for example, through the reduction of chemicals, sand and waste treatment. The developed reference framework and calculation model support companies in their investment decisions and technology adoption. Laser cleaning significantly reduces the use of chemicals and sand and reduces the amount of waste, which supports sustainable development goals.

Cooperation between companies, research institutes, and financier enabled the sharing of expertise and the development of technology. The results of the MALAMA project confirm that laser cleaning is a promising, safe, and environmentally friendly solution for industrial surface treatment processes.

Sisällys

Saatteeksi	2
Tiivistelmä.....	3
Abstract	4
Sisällys.....	5
1. Johdanto	8
2. Työpaketti 1: Uusien käyttösovellusten ideointi ja testaus	10
Tavoite	10
Yrityskontaktointi, ideointityöpajat ja sprintit	10
Laserteknologian sovellukset pakkaus- ja pintakäsittelyssä	11
Laserpuhdistuksen soveltuvuus teollisiin käyttökohteisiin	12
Käsiikäyttöisen laserpuhdistuslaitteen testaus ja turvallisuuskäsitteet.....	12
Yhteenveto	13
3. Työpaketti 2: Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle sekä laserteknologialle	14
Tavoite	14
Tarkastelutavat	14
Raepuhallusteknologian ja laserteknologian nykytila	14
Johtopäätökset	15
4. Työpaketti 3: Pintojen esivalmistelut laserteknologialla laboratorio-olosuhteissa	17
Tavoite	17
Laserpuhdistuksen kehittäminen pintojen esivalmistelussa	17
Pulssilaserlaitteen käyttö monikerroksisten pinnoitteiden poistossa	17
Laserpuhdistusprosessin seuranta reaaliaikaisesti ääniantureilla	18
Laserpuhdistuksen onnistumisen arviointi monipuolisilla menetelmillä	18
Laserpuhdistusprosessin optimointi.....	19
Laserpuhdistuksen energiankulutuksen ja vapautuneen pölynmäärän arviointi	19

Laserpuhdistuksen seuranta ja arviointi useilla anturimenetelmillä	20
Laserpuhdistuksen soveltaminen monimateriaaliliitoksiin	20
Tietoisuuden lisääminen ja turvallisuuskäytännöt.....	21
Yhteenveto	22
5. Työpaketti 4: Laserteknologian testaukset todellisessa käyttöympäristössä	23
Tavoitteet	23
Laserpuhdistuksen testaus simuloidussa teollisessa ympäristössä QTT:n laboratoriossa.....	23
Laserpuhdistuksen reaaliaikainen seuranta simuloidussa ympäristössä teollisia sovelluksia varten.....	24
Taustaselvitys laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen tueksi	24
Käytetyt materiaalit sekä testausmenetelmät laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen arvioinnissa	24
Laserpuhdistus ja -kiillotus vaihtoehtona perinteisille menetelmille	25
Laserpuhdistuksen sekä -kiillotuksen vaikutusten arviointi korroosio- ja pinnankarheusmittauksilla.....	26
Laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen optimointi laserpuhdistuslaitteen säätöarvojen avulla	27
Laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen kehittämisen tulokset	27
Laserpuhdistuksen kokeilujakso Rauman telakalla	28
Innovaatioympäristön rakentaminen QTT:llä	28
Monikerroksisten maalien poisto.....	29
Laserpuhdistuksen tarkkuus, ympäristöystävällisyys ja turvallisuus teollisessa käytössä	30
Tiedon jakaminen ja osaamisen kehittäminen.....	30
Yhteenveto	31
6. Työpaketti 5: Kustannusanalyysi eri teknologioista/niiden käyttöönotosta sekä analyysi uusien teknologioiden optimaalisesta integraatiosta tiedonsiirron näkökulmasta	32
Tavoite	32
Tulokset	32
7. Työpaketti 6: Viestintä ja tulosten levittäminen	34
Yleistä	34
Tulosten levittäminen.....	34
Hankkeeseen pohjautuvat opinnäytetyöt sekä vertaisarvioidut tieteelliset julkaisut.....	34
8. MALAMA investointihanke: laserpuhdistusinnovaatioympäristön luominen	36

MALAMA-laserpuhdistusinnovaatioympäristö	36
Kehitystyön mahdollistaja	37
9. Yhteenveto	38
Yhteistyö tutkimusekosysteemien ja yritysten kanssa laserpuhdistusteknologian kehittämisessä	38
Yrityksiä hyödyttävät uudet arviointimenetelmät	39
Laserpuhdistustestien konkreettiset tulokset ja niiden hyödyntäminen jatkossa.....	39
Uraauurtavat monitorointikeinot, tutkimusdata ja innovaatioympäristö laserpuhdistuksen kehittämisessä	40
Lopuksi.....	40

1. Johdanto

MALAMA-hanke on kehitetty laivanrakennusteollisuuden pintojen edistyneen esikäsittelyn tarpeeseen. Hankkeen tavoitteena oli selvittää laserpuhdistustekniikan mahdollisuuksia taloudellisuuden ja ympäristön kannalta ja pyrkiä näin edistämään tekniikan käyttöä laivanrakennuksessa ja pakkausteollisuudessa. MALAMA-investointihanke on mahdollistanut MALAMA-kehittämishankkeen tavoitteiden saavuttamista eli arvioimaan laserteknologian soveltuvuutta ja tehokkuutta verrattuna perinteisiin puhdistusmenetelmiin käytännön testien ja mittausten avulla.

MALAMA-hankkeen päätavoitteeseen vastaamiseksi olivat hankkeen osatavoitteina:

- i) muodostaa kokonaiskuva nykyisin käytössä olevasta raepuhallusteknologiasta sekä laserteknologiasta erityisesti niiden ympäristön kuormittavuuden sekä taloudellisuuden näkökulmista;
- ii) testata eri laserteknologian soveltuvuutta pintojen puhdistukseen laboratorio-olosuhteissa;
- iii) testata laboratoriokokeiden perusteella lupaavimpia laserteknologioita todellisessa käyttöympäristössä; ja
- iv) tunnistaa kokonaistaloudellisesti edullisin laserteknologian vaihtoehto laivanrakennuksen ja pakkausteollisuuden kontekstiin ja analysoida uusien teknologioiden optimaalista integraatiota tiedonsiirron näkökulmasta.

Hankkeen tavoitteiden toteutumiseen liittyvät toimenpiteet oli jaettu kuuteen työpakettiin:

- 1) Uusien käyttösovellusten ideointi ja testaus,
- 2) Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle sekä laserteknologialle,
- 3) Pintojen esivalmistelut laserteknologialla laboratorio-olosuhteissa,
- 4) Laserteknologian testaukset todellisessa käyttöympäristössä,
- 5) Kustannusanalyysi eri teknologioista/niiden käyttöönotosta sekä analyysi uusien teknologioiden optimaalisesta integraatiosta tiedonsiirron näkökulmasta ja
- 6) Viestintä ja tulosten levittäminen

Hankkeen tavoitteiden toteutumisen tuloksena on saatu kattava käsitys siitä, miten laserteknologia soveltuu maalattavien pintojen esikäsittelyyn meriteollisuudessa. Arvio perustuu sekä laboratoriossa että telakka-hallissa tehtyihin käytännön testauksiin, joissa laserpuhdistusta on kokeiltu erilaisilla pinnoilla ja olosuhteissa. Näiden kokeiden avulla on voitu arvioida menetelmän tehokkuutta, turvallisuutta ja käytännön soveltuvuutta.

Ympäristövaikutuksia on selvitetty jätteenkäsittelyn näkökulmasta. Laserpuhdistus tuottaa huomattavasti vähemmän jätettä kuin perinteiset menetelmät, kuten hiekkapuhallus, mikä tekee siitä ympäristön kannalta houkuttelevan vaihtoehdon. Hankkeessa on myös tarkasteltu mahdollisten haitallisten höyryjen muodostumista ja niiden hallintaa, erityisesti suljetuissa tiloissa.

Taloudellista näkökulmaa on analysoitu elinkaarilaskennan avulla. Laskelmissa on arvioitu laserteknologian kustannuksia ja hyötyjä pitkällä aikavälillä, mukaan lukien investointitarpeet, käyttökustannukset ja vaikutukset tuotannon tehokkuuteen. Tulokset osoittavat, että teknologia voi tuoda säästöjä ja parantaa prosessien hallittavuutta.

Lisäksi on tarkasteltu, miten digitaalisen laserteknologian käyttöönotto vaikuttaa yritysten liiketoimintamalleihin. Teknologia voi avata uusia mahdollisuuksia, mutta edellyttää myös uudenlaista osaamista ja toimintatapojen kehittämistä.

MALAMAN kohderyhmänä on ollut erityisesti Satakunnan alueen meriklusteri ja pakkausteollisuus sekä alueen muut tekniikasta mahdollisesti hyötyvät teknologiateollisuuden osaamiskeskittymät, koulutus- ja tutkimuslaitokset sekä viranomaiset. Maamme laivanrakennusteollisuus alihankkijoineen ja kokonaistoimittajineen on kuitenkin varsin kapea sektori ja jotkut tietyt toiminnot ovat sijoittuneet vain jollekin tietylle alueelle palvellen silti koko maata. Kaikki merkittävä kehitys maassamme aina lopulta koituu koko laivanrakennusteollisuuden hyödyksi, minkä vuoksi saimme mahdollisuuden kohdistaa hankkeen toimenpiteitä myös muissa maakunnissa kotipaikkaansa pitävälle yrityksille ja organisaatioille.

Hankkeen toimenpiteet toteutettiin Turun yliopiston kauppakorkeakoulun Porin yksikön ja Turussa sijaitsevan teknillisen tiedekunnan kone- ja materiaalitekniikan laitoksen yhteistyössä.

2. Työpaketti 1: Uusien käyttösovellusten ideointi ja testaus

Tavoite

Työpaketin 1 ”*Uusien käyttösovellusten ideointi ja testaus*” tavoitteena oli löytää uusia ja monipuolisia käyttökohteita laserpintateknologioille, kuten laserpuhdistukselle, ja lasermerkkaukselle sekä laserpinnanmuokkaukselle. Laserpintateknologiat ovat menetelmiä, joilla käsitellään materiaalien pintoja tarkasti ja ilman mekaanista kosketusta. Laserpuhdistuksella esimerkiksi poistetaan epäpuhtauksia tai pinnoitteita (mm. maalia), lasermerkkaukseen puolestaan tuottaa pysyviä merkintöjä esimerkiksi tunnistusta varten, ja laserpinnanmuokkauksella voidaan muuttaa pinnan rakennetta tai ominaisuuksia mm. tarttuvuuden tai kulutuskestävyyden parantamiseksi. Työpaketissa ei rajoitettu pelkästään laivanrakennukseen vaan etsittiin sovelluksia myös muilta teollisuuden aloilta, kuten pakkausteollisuudesta, rakennusosalta ja konepajateollisuudesta. Tarkoituksena oli tunnistaa tilanteita, joissa laserpuhdistus tai muu lasertyöstö voisi korvata perinteisiä menetelmiä tehokkaammin, turvallisemmin ja ympäristöystävällisemmin.

Työ toteutettiin työpajoina, joissa yritysten edustajat, asiantuntijat ja tutkijat kokoontuivat ideoimaan mahdollisia käyttökohteita. Työpajat tarjosivat tilaisuuden avoimeen keskusteluun ja ideointiin, ja niiden kautta saatiin arvokkaita näkemyksiä suoraan käytännön toimijoilta. Lupaavimmista ideoista valittiin kohteita, joita testattiin sprintteinä eli nopeina ja rajattuina kokeiluina ensin laboratorio-olosuhteissa. Näiden kokeilujen perusteella menetelmän toimivuutta arvioitiin edelleen vaativammassa ympäristöissä, kuten telakkahallissa.

Tavoitteena oli myös edistää yritysten ja tutkimuksen välistä yhteistyötä ja luoda pohjaa uusien teknologisten ratkaisujen kehittämiseksi. Yritysten aktiivinen osallistuminen ja halukkuus toimittaa materiaaleja testaukseen osoittivat, että kiinnostus laserteknologian soveltamiseen on vahvaa ja käytännönläheistä.

Yrityskontaktointi, ideointityöpajat ja sprintit

MALAMA-hankkeen käynnistyessä aloitettiin yritys-yhteistyön rakentaminen ottamalla suoraan yhteyttä keskeisiin yritys-edustajiin. Yrityksiltä kartoitettiin laserpuhdistusteknologian nykyistä käyttöä, tulevaisuuden suunnitelmia sekä kiinnostusta osallistua hankkeen toimenpiteisiin. Ensimmäinen työpaja järjestettiin verkossa 14.12.2023 ja siihen osallistui kahdeksan yritysten ja tutkimusorganisaatioiden edustajaa. Työpajassa esiteltiin hankkeen tavoitteet ja sisältö, minkä jälkeen osallistujat jakoivat näkemyksiään laserteknologian nykytilasta ja mahdollisista uusista sovelluskohteista. Keskusteluissa nousi esiin erityisesti tarve kehittää teknologiaa teollisiin käyttötarkoituksiin, joissa vaaditaan tarkkuutta, kestävyyttä ja ympäristöystävällisyyttä.

Toinen työpaja järjestettiin 23.1.2024 Rauma Marine Constructions Oy:n (RMC) tiloissa Raumalla. Tapahtumaan osallistui 15 yritys-edustajaa ja tutkijaa, jotka yhdessä ideoivat uusia käyttökohteita lasertekniikalle. Työpajassa saatiin arvokkaita ideoita erityisesti meriteollisuuden ja pakkausteollisuuden tarpeisiin. Lisäksi useat yritykset lupautuivat toimittamaan testimateriaaleja tulevaa sprinttiä eli nopeaa lasertyöstökokeilua varten, mikä osoitti vahvaa sitoutumista hankkeen tavoitteisiin.

Sprintti tarkoittaa tässä hankkeessa nopeaa ja intensiivistä kokeilujaksoa, jossa testataan laserpuhdistusteknologian soveltuvuutta käytännön olosuhteissa. Sprintit toteutettiin järjestämällä käytännön kokeilutilaisuus, jossa yrityksiltä saatuja materiaaleja käsiteltiin lasersäteiden avulla eri tavoin laboratorioissa (QTT, entinen Kone- ja metalliteknologiateknologikeskus Turku Oy KTK) tai teollisessa ympäristössä. Osallistujat arvioivat paikan päällä

lasertyöstön tuloksia ja keskustelivat teknologian soveltuvuudesta eri käyttökohteisiin. Tavoitteena oli tuottaa nopeasti konkreettista tietoa teknologian toimivuudesta ja mahdollisista uusista käyttökohteista.

Ensimmäinen sprintti toteutettiin 13.3.2024 konetekniikan laboratoriossa. Sprinttiin osallistui 18 henkilöä, jotka arvioivat yhdessä lasertyöstöjen tuloksia. Testattavaksi oli saatu materiaaleja, jotka liittyivät erityisesti meriteollisuuden komponentteihin ja pakkausmateriaalien käsittelyyn. Sprintissä hyödynnettiin erilaisia lasertyöstömenetelmiä ja tuloksia analysoitiin sekä teknisestä että soveltavuuden näkökulmasta.

Toinen sprintti järjestettiin 10.4.2024 RMC:n telakkahallissa, jossa olosuhteet olivat keskivaikkeat ja vastasivat teollista ympäristöä. Tilaisuuden aluksi RMC:n edustaja esitteli telakan toimintaympäristön ja turvallisuusnäkökulmat, minkä jälkeen kolme lasertyöstöä tarjoavaa yritystä demonstroi menetelmiään osallistujille. Demonstraatiot toteutettiin yritysten tuomilla laserlaittejärjestelmillä, ja paikalla oli yhteensä 25 osallistujaa. Sprintti tarjosi konkreettisen mahdollisuuden arvioida laserteknologian toimivuutta käytännön olosuhteissa.

Työpajojen, sprinttien ja niihin liittyvien viestinnällisten toimenpiteiden avulla onnistuttiin tavoittamaan hankkeen kannalta keskeisiä yrityksiä. Yrityksille esiteltiin hankkeen sisältö ja laserteknologian mahdollisuudet, ja heitä saatiin mukaan ideoimaan uusia sovelluskohteita sekä toimittamaan materiaaleja kokeiluihin. Näiden toimenpiteiden ansiosta hanke eteni suunnitellusti, ja saatiin arvokasta dataa jatkotoimenpiteitä varten.

Laserteknologian sovellukset pakkaus- ja pintakäsittelyssä

Työpaketissa toteutettiin myös kokeita, joissa testattiin laserteknologian soveltuvuutta kahdella eri osalla. Ensimmäinen osa keskittyi lasermerkintään pakkaussektorilla. Tavoitteena oli kehittää menetelmiä, joilla voidaan tuottaa tarkkoja ja kestäviä merkintöjä erilaisille pakkausmateriaaleille ilman lisäkemikaaleja. Tämä lähestymistapa tukee ympäristöystävällisiä ja kierrätettäviä pakkausratkaisuja, jotka ovat yhä tärkeämpiä kestävä kehityksen näkökulmasta. Kokeissa testattiin muun muassa kartongin, muovin ja metallin merkintää, ja saatiin lupaavia tuloksia erityisesti merkintöjen tarkkuuden ja pysyvyyden osalta.

Toinen osa keskittyi laserkuviointiin, jonka avulla pyrittiin luomaan hydrofobisia ja hydrofiilisiä pintoja. Näissä kokeissa jäljiteltiin luonnon pintarakenteita, kuten lootuksenlehden vettä hylkivää pintaa. Laserteknologialla aikaansaadut mikrorakenteet mahdollistivat pintojen ominaisuuksien muokkaamisen ilman kemiallisia aineita. Tällaisilla pinnoilla on potentiaalia esimerkiksi biosensoreissa, nesteen hallinnassa ja lääketieteellisissä sovelluksissa. Kokeiden tulokset julkaistiin myös tieteellisessä artikkelissa, jossa esiteltiin saavutetut löydökset ja mainittiin MALAMA-hankkeen rahoitus (DOI: 10.3390/biomimetics9040209).

Kokeiden perusteella voitiin todeta, että laserteknologia tarjoaa monipuolisia mahdollisuuksia sekä teollisiin että luonnon toimintaa jäljitteleviin eli biomimeettisiin sovelluksiin. Laserkuviointin avulla pintoihin voitiin luoda tarkasti hallittuja mikrorakenteita, jotka vaikuttivat niiden fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten veden hylkimiseen tai nesteen ohjautumiseen. Tällaisia rakenteita on havaittu luonnossa esimerkiksi lootuksenlehdessä, jonka pinta hylkii vettä tehokkaasti. Laserteknologialla tuotetut pintakuviot mahdollistivat vastavien ominaisuuksien aikaansaamisen ilman kemiallisia aineita, mikä tekee menetelmästä ympäristöystävällisen ja soveltuvan esimerkiksi biosensoreihin, lääketieteellisiin laitteisiin tai nesteen hallintaan. Laserkuviointin tarkkuus ja muokattavuus avasivat uusia mahdollisuuksia materiaalien toiminnalliseen suunnitteluun, jossa yhdistyvät tekninen suorituskyky ja luonnon inspiroima tehokkuus. Näin laserteknologia osoittautui käyttökelpoiseksi sekä perinteisessä teollisuudessa että innovatiivisissa, luonnon ilmiöitä hyödyntävissä ratkaisuissa.

Laserpuhdistuksen soveltuvuus teollisiin käyttökohteisiin

Hankkeessa testattiin ja kehitettiin myös laserteknologian soveltuvuutta erilaisten pintojen puhdistukseen teollisissa ympäristöissä. Tämä kehitystyö jaettiin kolmeen osioon, joissa keskityttiin eri materiaalien ja jäämien poistoon.

Laserpuhdistusta sovellettiin polymeerijäämien poistamiseen kromilevyiltä, jotta voitiin testata menetelmän tehokkuutta ilman mekaanista kulutusta tai kemiallisia aineita. Tavoitteena oli kehittää pintojen esikäsitteilyyn soveltuva ratkaisu, joka säilyttää materiaalin eheyden ja tukee ympäristöystävällisiä tuotantotapoja. Lisäksi haluttiin arvioida, miten laserpuhdistus vaikuttaa kromipinnan ominaisuuksiin jatkokäsittelyä, kuten maalausta, varten. Menetelmä osoittautui tehokkaaksi, sillä puhdistus voitiin toteuttaa ilman mekaanista kulutusta tai kemiallisia puhdistusaineita. Tämä vähensi materiaalien kulumista ja paransi prosessin ympäristöystävällisyyttä.

Infrapunaa heijastavan pinnoitteen poistamista lasesta testattiin, jotta voitiin arvioida laserpuhdistuksen tarkkuutta ja vaikutusta herkkiin materiaaleihin. Tavoitteena oli varmistaa, että laserpuhdistusmenetelmä ei vahingoita lasipintaa, vaikka pinnoite poistetaan tehokkaasti. Lisäksi haluttiin kehittää menetelmä, joka mahdollistaa optisten komponenttien turvallisen ja hallitun puhdistuksen ilman kemiallisia aineita. Tämä vaati erityistä tarkkuutta prosessinhallinnassa, jotta lasipinta säilyi vahingoittumattomana. Kokeissa onnistuttiin säilyttämään lasin optiset ominaisuudet samalla kun pinnoite poistettiin hallitusti.

Kolmannessa osiossa laserpuhdistusta sovellettiin elintarvikejäämien, kuten suklaan ja maapähkinävoin, poistamiseen ruostumattomasta teräksestä, jotta voitiin kehittää hygieeninen ja materiaaliturvallinen puhdistusmenetelmä elintarviketeollisuuden tarpeisiin. Tavoitteena oli löytää ratkaisu, joka poistaa jäämät tehokkaasti ilman kemiallisia aineita tai mekaanista kulutusta, ja samalla säilyttää teräspinnan eheys. Menetelmää haluttiin testata erityisesti tilanteissa, joissa puhdistettavat pinnat ovat kosketuksissa elintarvikkeisiin ja vaativat korkeaa puhtausastetta. Tämä osio oli erityisen merkittävä elintarviketeollisuuden näkökulmasta, jossa hygieniä ja materiaalien eheys ovat kriittisiä tekijöitä.

Laserpuhdistuksen kehitystyön tulokset osoittivat selvästi, että menetelmä tarjoaa tehokkaan ja nykyaikaisen vaihtoehdon perinteisille puhdistustekniikoille teollisuudessa. Laserpuhdistus on nopea ja kontaktiton, eli se ei vaadi fyysistä kosketusta puhdistettavaan pintaan. Tämä vähentää materiaalien kulumista ja vaurioitumisen riskiä, mikä on erityisen tärkeää silloin, kun käsitellään herkkiä tai arvokkaita pintoja.

Menetelmä osoittautui myös ympäristöystävälliseksi, koska se ei tarvitse kemiallisia puhdistusaineita tai mekaanista hankausta. Tämä vähentää haitallisten aineiden käyttöä ja parantaa työturvallisuutta sekä prosessin kestävyyttä. Lasersäteen avulla puhdistus voidaan kohdistaa tarkasti haluttuun kohtaan, mikä mahdollistaa erittäin hallitun ja siistin lopputuloksen. Kokeissa laserpuhdistus toimi hyvin monenlaisilla materiaaleilla, kuten kromilevyillä, lasipinnoilla ja ruostumattomalla teräksellä. Menetelmä säilytti pintojen rakenteellisen eheyden ja puhtauden, mikä on tärkeää jatkokäsittelyä varten, esimerkiksi maalaus-, liimaus- tai hitsausvaiheissa. Näiden ominaisuuksien ansiosta laserpuhdistus soveltuu erinomaisesti vaativiin teollisiin käyttökohteisiin, joissa yhdistyvät tehokkuus, tarkkuus, turvallisuus ja ympäristövastuullisuus.

Käsitönnöisen laserpuhdistuslaitteen testaus ja turvallisuusnäkökulmat

Laserpuhdistuksen soveltuvuutta testattiin myös käsitönnöisellä laserpuhdistuslaitteella, joka oli hankittu MALAMA-investointihankkeen yhteydessä. Käsitönnöinen laserpuhdistuslaite on laite, jota käyttäjä ohjaa manuaalisesti puhdistettavan pinnan päällä. Toisin kuin kiinteät tai automatisoidut laserlaitteet, käsitönnöi-

nen versio tarjoaa joustavuutta ja mahdollistaa tarkat puhdistustoimenpiteet myös vaikeapääsyisissä tai monimuotoisissa kohteissa. Laite muistuttaa ulkoisesti esimerkiksi hitsauspoltinta, mutta sen toiminta perustuu lasersäteen käyttöön epäpuhtauksien poistamiseksi materiaalin pinnalta. Käsikäyttöistä laserlaitetta voidaan käyttää esimerkiksi tuotantolinjojen huollossa, korjaustöissä tai paikan päällä tapahtuvassa puhdistuksessa, missä kiinteät laitteet eivät ole käytännöllisiä. Lisäksi käyttäjä voi säätää puhdistuksen tarkkuutta ja kohdistaa lasersäteen juuri haluttuun kohtaan, mikä parantaa työn laatua ja vähentää materiaalihukkaa.

Toisaalta käsikäyttöisessä laserteknologiassa on myös haasteita verrattuna perinteisiin, automatisoituihin laserlaitteisiin. Koska laitetta ohjataan käsin, puhdistuksen tasalaatuisuus voi vaihdella käyttäjän kokemuksen ja tarkkuuden mukaan. Lisäksi manuaalinen käyttö vaatii enemmän huomiota turvallisuuteen, sillä lasersäde voi olla vaarallinen, jos sitä käytetään väärin tai ilman asianmukaisia suojavarusteita, etenkin kun käyttäjä on lähellä säteen vaikutusaluetta. Lasersäteet voivat aiheuttaa silmä- ja ihovaurioita, ja siksi tarvitaan suojalaseja, suojavaatetusta ja selkeitä työohjeita. Oikea koulutus ja turvallisuuskäytännöt varmistavat, että laitetta voidaan käyttää tehokkaasti ja turvallisesti teollisissa ympäristöissä.

Vertailutestit käsikäyttöisellä laserpuhdistuslaitteella tehtiin osana aiemman kehitystyön jatkoa, jotta voitiin arvioida uuden laitteen toimivuutta verrattuna jo käytössä olleeseen pulssilaserlaitteistoon. Tavoitteena oli selvittää, miten käsikäyttöinen laite suoriutuu erilaisista puhdistustehtävistä teollisessa ympäristössä, ja soveltuuko se käytännön tarpeisiin, joissa vaaditaan joustavuutta, tarkkuutta ja nopeaa reagointia.

Testaus toteutettiin käytännön kokeilla, joissa molempia laitteita käytettiin samoihin puhdistuskohteisiin. Näin voitiin vertailla puhdistustuloksia, työskentelymukavuutta ja prosessin hallittavuutta. Käsikäyttöinen laser osoitti etunsa erityisesti tilanteissa, joissa puhdistettava pinta oli vaikeasti saavutettavissa tai muodoltaan monimutkainen. Käyttäjä pystyi ohjaamaan lasersädettä tarkasti haluttuun kohtaan, mikä paransi puhdistuksen laatua ja vähensi materiaalihukkaa.

Vertailutestien tulokset tarjosivat arvokasta tietoa laitteen soveltuvuudesta ja kehitystarpeista, ja tukivat laserpuhdistuksen jatkokehitystä kohti entistä käytännöllisempiä ja turvallisempia ratkaisuja.

Yhteenveto

Tämän työpaketin toimenpiteet osoittivat laserpuhdistusteknologian monipuolisuuden ja sovellettavuuden eri teollisuudenaloilla. Yritysyhteistyön avulla saatiin arvokkaita ideoita ja materiaaleja, joiden avulla voitiin toteuttaa konkreettisia kokeita ja arvioida teknologian soveltuvuutta käytännössä. Lasermerkintä, kuviointi ja puhdistusmenetelmät tarjosivat uusia ratkaisuja, jotka tukevat kestävästä kehityksestä, tuotantoprosessien tehostamista ja materiaalien toiminnallista muokkaamista.

Hankkeen toimenpiteet edistivät laserteknologian tunnettuutta ja käyttöä, ja niiden avulla saatiin hyvää dataa jatkokehitystä varten. Toimenpiteet vahvistivat, että laserteknologia tarjoaa tehokkaita ja ympäristöystävällisiä ratkaisuja, jotka vastaavat nykypäivän teollisuuden tarpeisiin.

3. Työpaketti 2: Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle sekä laser- teknologialle

Työpaketin 2 nykytila-analyysistä ja tuloksista on koostettu erillinen raportti, joten niistä esitetään tässä yhteydessä vain kooste.

Tavoite

Työpaketin 2 ”Nykytila-analyysit raepuhallusteknologialle sekä laserteknologialle” tavoitteena oli muodostaa kokonaiskuva nykyisin käytössä olevasta raepuhallusteknologiasta sekä laserteknologian mahdollisuuksista teollisuuden prosesseissa. Painopisteenä analyysissä oli tarkastella menetelmiä erityisesti niiden ympäristön kuormittavuuden, taloudellisuuden sekä ergonomian näkökulmista.

Hiekka- ja raepuhallus ovat niin sanottuja perinteisiä menetelmiä, joita meriteollisuuden isojen pintojen puhdistusprosesseissa pääasiallisesti käytetään. Laserpuhdistustekniikkaa on eri teollisuuden aloilla hyödynnetty jo pitkään erilaisissa sovelluskohteissa, kuten hitsauksen, leikkauksen ja merkinnän sovelluksissa, mutta käyttö pintojen puhdistuksessa on edelleen vähäistä. Niin ikään rajallista on tietoisuus lasersäteen käytön mahdollisuuksista puhdistusprosesseissa.

Tarkastelutavat

Hankkeessa molempia teknologioita analysoitiin muun muassa kirjallisuuskatsauksen ja SWOT- eli nelikenttäänalyysin avulla. Tehdyistä yrityshaastatteluista ja kirjallisuudesta esiin nousseet tekijät jaoteltiin vahvuuksiin, heikkouksiin, mahdollisuuksiin ja uhkiin (*strengths, weaknesses, opportunities, threats*). Menetelmien osalta tarkasteltiin käyttökelpoisuutta, kustannuksia, tehokkuutta, laadunhallintaa, ympäristötekijöitä, henkilöstöltä vaadittavaa osaamista, terveysvaikutuksia ja ergonomisia tekijöitä, turvallisuustekijöitä, säätelyä, standardeja ja asiakasvaatimuksia sekä innovaatio- digitalisaatio- ja uusien toimintatapojen mahdollisuuksia aina tilanteeseen soveltuvien osien. Kaikki teemat eivät olleet keskeisiä kaikille haastatetuille yrityksille eikä kaikissa yrityksissä seurattu tarkkaan esimerkiksi menetelmien käytöstä aiheutuvia kustannuksia tai jätemääriä ja niiden käsittelyn aiheuttamia kuluja.

Hankkeessa tehdyn työn pohjalta on lisäksi tunnistettu määrällisiä ja laadullisia mittareita, joiden avulla voidaan arvioida hiekka- ja raepuhallusmenetelmän sekä laserpuhdistustekniikan eroja. Mittarit kuvaavat näiden eri näkökulmia, haittoja ja etuja, ottaen huomioon esimerkiksi menetelmien resurssien käytön, työ- turvallisuusnäkökulmat ja vaikutukset ympäristöön.

Raepuhallusteknologian ja laserteknologian nykytila

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien ja laserpuhdistusteknologian nykytila-analyysin tulokset osoittavat, että molemmille menetelmille on käyttöä meriteollisuusyrityksissä. Koska puhdistusta vaativia sovelluskohteita on erilaisia, on kunkin kohteen kohdalla valittava tilanteeseen parhaiten sopiva menetelmä. Hiekka- ja raepuhallusmenetelmät soveltuvat nopeutensa ja tehokkuutensa puolesta erityisesti isojen kappaleiden, kuten laivanrunkojen, puhdistamiseen eikä laserpuhdistustekniikka vielä kykene kilpailemaan tällä saralla vaan sille on omat käyttökohteensa. Toisaalta on laserpuhdistus menetelmänä nopeampi ja tehokkaampi ja soveltuu

hyvin esimerkiksi tarkkoihin puhdistustöihin, kuten moottorien puhdistamiseen tai muihin herkkiin kohteisiin, joissa pölyttömyys ja kemikaalittomuus ovat avainasemassa.

Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien suurena etuna on, että niitä käytettäessä saadaan ennalta odotettu, luotettava tulos puhtausasteen suhteen, koska menetelmille on määritelty selkeät standardit. Laivanrakennuksessa on äärimmäisen tärkeää saada esikäsittelyllä pinnalle juuri oikeanlainen karheus, joka on jatkotoimenpiteiden, kuten maalaamisen ja etenkin maalin tarttumisen varmistamisen kannalta, onnistumisen edellytys. Laserpuhdistuskäsittelylle ei ole vielä asetettu vastaavanlaisia karheusstandardeja, mikä rajoittaa sen käyttöä esimerkiksi maalausta edeltävissä esikäsittelyissä. Yritykset toivovatkin selkeitä ohjeistuksia ja standardeja, jotka mahdollistaisivat menetelmän laajemman käyttöönoton.

Laserlaitteiston alkuinvestointi on edelleen kalliimpi kuin perinteisten menetelmien, mutta investointi voi olla pidemmällä aikavälillä varteenotettava. Kustannussäästöjä voi tällöin syntyä esimerkiksi kemikaalien, hiekan ja jätteenkäsittelyn vähentyessä. Lisäksi on odotettavissa, että laitteistojen hinnat laskevat tulevaisuudessa. Laserpuhdistus aiheuttaa vähemmän haitallisia ympäristövaikutuksia, kuten pölyn muodostumista, kemikaalien käyttöä sekä jätteiden syntyä puhdistusprosessin aikana suhteessa perinteisiin menetelmiin.

Laserpuhdistustekniikka on ympäristöystävällisyyden lisäksi ystävällisempi myös käyttäjälle liittyen terveysvaikutuksiin ja ergonomiaan. Muun muassa pölyhaittoja ei aiheudu käyttäjälle samalla tavalla kuin hiekka- ja raepuhalluksessa. Laserlaitteen käyttö vaatii aina ohjeiden ja erityisen varovaisuuden noudattamista: työntekijä ja ympäristö pitää aina suojata säteiltä asianmukaisesti. Lasertekniikassa turvallisuustekijät ovat keskeisiä eikä turvallisuutta voi laiminlyödä. Tosin myös hiekka- ja raepuhallusmenetelmien käytössä pitää varautua mahdollisiin vaaratilanteisiin, kuten liukastumisiin, laitteen letkun mahdollisen irtoamisesta aiheutuviin osumiin tai ahtaissa tiloissa työskentelyn vaaroihin.

Hankkeen haastatteluihin osallistuneet yritysedustajat suhtautuivat laserpuhdistusteknologiaan pääosin avoimesti. Teknologian laajamittaisempi käyttöönotto edellyttäisi kuitenkin oikeellista tietoa turvallisuusvaatimuksista, käyttökoulutusta ja asiakastarpeiden tarkempaa ymmärtämistä. Laserteknologian potentiaali teollisuuden puhdistusprosesseissa on merkittävä, ja MALAMA-hankkeen tulokset tukevat teknologian käyttöön ja käyttösovelluksiin liittyvää jatkokehitystä ja standardointia osana kestävää ja turvallista teollisuutta.

Johtopäätökset

MALAMA-hankkeen kirjallisuuteen, yrityshaastatteluihin sekä laboratorio- ja telakkahallissa tehtyihin testeihin perustuvien eri puhdistusmenetelmien vertailujen avulla saatiin paljon lisätietoa perinteisten puhdistusmenetelmien ja uudempaan teknologian lasertekniikan ominaisuuksista ja nykytilasta. Laivanrakennusteollisuudessa toimivien yritysten näkemykset ja käytännön kokemukset olivat valaisevia ja tulevaisuuden tarpeisiinkin luotsaavia. Vaikka lasertekniikkaa ei vielä käytetäkään laivanrakennuksen isojen pintojen esikäsittelyssä, suhtautuivat haastatellut lasertekniikkaan muilta osin avoimin ja uteliain mielin sekä pohtivat tekniikalle mahdollisia uusia käyttökohteita. Yrityksillä oli tiedossa laserlaitteiston nykyisellään suhteellisen kallis alkuinvestointi, mikä yhdistettynä asiakkaitten vielä tuntemattomaan suhtautumiseen teknologian käyttöön yleisesti, sen tekemään puhdistusjälkeen ja kenties palvelun hieman kalliimpaan hintaan jarruttaa investointihalukkuutta. Myös mm. ympäristöön liittyvä sääntelykin vielä kehittyy ja luo tiettyä epävarmuutta tulevista vaatimuksista. Hankkeen aikana kävi selkeästi ilmi, että laserlaitteiston käyttöön liittyvät turvallisuusvaatimukset sekä luotettavan ja oikeellisen tiedon saaminen yrityksille on kokonaisuus, joka vaatii vielä paljon selvitys- ja koulutustyötä. Turvallisen käytön varmistamiseen tarvitaan selkeää ohjeistusta.

Tarkempi kuvaus työpaketin 2 tuloksista löytyy raportista:

Aro Elisa, Piili Heidi, Laitio Kirsi, Kamboj Nikhil, Väisänen Inka, Tourunen Eter, Tarson Kristina, Valtonen Eetu, Tähtinen Satu & Huusko Anna (2025). Hiekka- ja raepuhallusmenetelmien sekä laserpuhdistusteknologian nykytila-analyysi. MALAMA-hankkeen raportti.

4. Työpaketti 3: Pintojen esivalmistelut laserteknologialla laboratorioolosuhteissa

Tavoite

Hankkeen työpaketissa 3 ”*Pintojen esivalmistelut laserilla laboratorio-olosuhteissa*” arvioitiin laserpuhdistusteknologian soveltuvuutta maalattavien pintojen esivalmistelussa. Tavoitteena oli testata ja kehittää menetelmiä, joilla voidaan puhdistaa erilaisia pintoja tehokkaasti ennen maalausta, erityisesti teollisissa olosuhteissa. Testit toteutettiin QTT:n (Quad Tech Turku, ent. Koneteknologiakeskus Turku Oy - KTK) laboratorioympäristössä, jossa voitiin hallitusti arvioida laitteiden suorituskkyä ja soveltuvuutta.

Testausten avulla oli tavoitteena määrittää, millainen laserpuhdistuslaitteisto on teknistaloudellisesti tarkoituksenmukaisin. Puhdistustehokkuuden lisäksi huomioitiin laitteen koko, paino, käsiteltävyys, energiankulutus ja ympäristövaikutukset. Erityistä huomiota kiinnitettiin siihen, miten laitteet toimivat erilaisissa olosuhteissa – laboratorioympäristön lisäksi testejä toteutettiin keskivaikeissa olosuhteissa, kuten telakan maalaushallissa ja simuloitiin vaikeissa olosuhteissa, kuten laivan sisätiloissa tapahtuviksi.

Testien avulla pyrittiin selvittämään, kuinka laserpuhdistus soveltuu pintojen esikäsitteilyyn ennen maalausta ja miten se vaikuttaa lopputuloksen laatuun. Tavoitteena oli löytää ratkaisu, joka vähentää mekaanista kuluusta ja kemiallisten aineiden käyttöä parantaen samalla prosessin ympäristöystävällisyyttä ja työturvallisuutta.

Laserpuhdistuksen kehittäminen pintojen esivalmistelussa

Hankkeen alussa kartoitettiin laajasti laserpuhdistuksen soveltumista maalausta tai liittämistä edeltävään pintojen esikäsitteilyyn. Laboratoriotesteissä arvioitiin menetelmän vaikutuksia materiaalin pintarakenteisiin, kuten karheuteen ja puhtauteen. Kokeiden suunnittelussa hyödynnettiin alan ISO-standardeja, joiden avulla laserpuhdistuksen laatua ja soveltuvuutta teollisiin käyttökohteisiin voitiin arvioida systemaattisesti. Selvitystyö osoittautui keskeiseksi osaksi testausvaiheen valmistelua, sillä sen avulla saatiin kattava kuva laserpuhdistuksen toimivuudesta, laitteiden suorituskyvystä ja ympäristövaikutuksista.

Koneteknologiakeskus Turku Oy:n (KTK) laboratorio-olosuhteissa toteutettujen kokeiden avulla pyrittiin määrittämään teknistaloudellisesti tarkoituksenmukaisin laitteisto, sen suorituskky sekä ympäristövaikutukset. Saadut tulokset tukivat menetelmän teollista soveltuvuutta.

Pulssilaserlaitteen käyttö monikerroksisten pinnoitteiden poistossa

Pulssilaserlaitetta testattiin monikerroksisten pinnoitteiden poistoon korkealujuusteräksiltä, joita tyypillisesti käytetään merenkulussa. Pulssilaser tuottaa lyhyitä, voimakkaita valopulsseja, jotka mahdollistavat tarkat puhdistustoimenpiteet ilman pohjamateriaalin vaurioitumista. Toisin kuin jatkuvantehon laserlaite (CW, continuous wave), joka lähettää valoa tasaisesti ja keskeytyksettä, pulssilaserlaite lähettää valoa lyhyinä purskeina, joiden kesto voi vaihdella nanosekunneista mikrosekunteihin. Pulssatun lasersäteen teho voi olla hetkellisesti erittäin suuri, vaikka kokonaisenergiankulutus pysyy maltillisena. Testeissä käytettiin EH36 -terästä ja erilaisia pinnoiteyhdistelmiä, kuten Intershield 300 ja Interthane 990E.

Pulssilasersäde soveltuu erityisesti tarkkuutta vaativiin tehtäviin, kuten pintojen puhdistukseen, mikromitta-kaavan työstöön tai materiaalien rakenteelliseen muokkaukseen. Esimerkiksi laserpuhdistuksessa pulssi-laserlaitteella voidaan poistaa maalikerros metallipinnalta ilman, että itse metalli vaurioituu. Tämä onnistuu, koska pulssi ehtii vaikuttaa vain pintakerrokseen ennen kuin lämpö leviää syvemmälle materiaaliin. Jatkuva-toiminen lasersäde puolestaan soveltuu paremmin esimerkiksi hitsaukseen tai leikkaukseen, joissa tarvitaan tasaista ja pitkäkestoista lämpöä. Esimerkiksi metallilevyn leikkaamisessa CW-laser voi tuottaa tasaisen ja syvän leikkausjäljen, kun taas pulssilaserlaitteella saadaan tarkka ja hallittu vaikutus pienelle alueelle.

Laserpuhdistusprosessin seuranta reaaliaikaisesti ääniantureilla

Kehittämistyöhön kuului myös näytteiden materiaalivalinta, esikäsittely ja pinnoitus. Puhdistus toteutettiin räätelöidyssä laserpuhdistussolussa, ja testauksen aikana käytettiin reaaliaikaista seuranta-akustisilla emissioantureilla (Xarion), jotta laserpuhdistusprosessia voitiin tarkkailla tarkasti ja turvallisesti. Anturit mit-tasivat lasersäteen aiheuttamia värähtelyjä, joiden avulla voitiin arvioida puhdistuksen tehokkuutta ja turval-lisuutta. Akustinen emissio tarkoittaa ääntä tai värähtelyä, joka syntyy, kun materiaaliin kohdistuu nopea ja paikallinen muutos lasersäteen ja materiaalin välisessä vuorovaikutuksessa. Ilmiö liittyy usein materiaalin rakenteellisiin muutoksiin, kuten murtumiseen, muodonmuutokseen tai jännityksen purkautumiseen. Xarion-anturi on erityinen laite, joka pystyy havaitsemaan nämä pienet akustiset signaalit erittäin tarkasti. Kun lasersäde osuu pintaan ja esimerkiksi poistaa likaa, maalia tai muuta kerrosta, syntyy pieniä ääniä, joita ei ihminen kuule, mutta anturi pystyy mittaamaan ne. Näiden signaalien perusteella voidaan arvioida, kuinka tehokkaasti puhdistus etenee, onko prosessi tasainen ja tapahtuuko mahdollisia poikkeamia, kuten vaurioita tai epätasaisuuksia. Reaaliaikainen seuranta mahdollistaa sen, että puhdistuksen etenemistä voidaan seurata ilman, että pintaan tarvitsee koskea tai keskeyttää prosessia.

Laserpuhdistuksen onnistumisen arviointi monipuolisilla menetelmillä

Laserpuhdistuksen onnistumista haluttiin arvioida mahdollisimman tarkasti, joten käytettiin useita eri mene-telmiä, jotka täydensivät toisiaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että lasersäteen vaikutusta pintaan ei arvi-oitu pelkästään silmämääräisesti vaan myös mittaamalla ja kuvaamalla pintaa tarkasti. Visuaalinen tarkastelu kertoi, miltä pinta näytti puhdistuksen jälkeen – oliko lika tai pinnoite poistunut ja oliko pinta ehjä. Pinta-karheusmittauksilla selvitettiin, kuinka sileäksi tai karheaksi pinta oli muuttunut ja mikä vaikuttaa esimerkiksi maalin tarttumiseen. Topografiakuvantaminen tuotti kolmiulotteisia kuvia pinnasta, joiden avulla voitiin nähdä pienetkin muutokset ja varmistaa, ettei puhdistus ollut vahingoittanut pintarakennetta. Lisäksi rönt-gendiffraktiolla (XRD) tutkittiin materiaalin sisäistä rakennetta. Tämä on tärkeää erityisesti metallien koh-dalla, koska niiden lujuus ja kestävyys riippuvat siitä, että sisäinen rakenne säilyy ennallaan. Jos laser aiheut-taisi muutoksia rakenteeseen, se voisi heikentää materiaalin käyttökelpoisuutta. Kun kaikki nämä menetel-mät yhdistettiin, saatiin varmuus siitä, että laserpuhdistus ei ainoastaan poistanut epäpuhtauksia tehokkaasti vaan myös säilytti materiaalin eheyden. Tämä tarkoittaa, että puhdistettu pinta oli puhdas, vahingoittumaton ja valmis jatkokäsittelyyn, kuten maalaamiseen, liimaamiseen tai hitsaukseen. Näin voitiin todeta, että me-netelmä soveltuu hyvin teollisiin käyttökohteisiin, joissa vaaditaan tarkkuutta, turvallisuutta ja luotetta-vuutta.

Laserpuhdistuksella poistettujen maalipintojen koostumusta analysoitiin röntgendiffraktiomittausten (XRD) avulla. Mittausten tuloksista havaittiin maalikerroksille tyypillisiä diffraktiopiikkejä, jotka vastasivat materi-aalitoimittajan ilmoittamia ainekoostumuksia. XRD-kuvaajien perusteella voitiin seurata maalikerrosten asteittaista poistumista sekä arvioida puhdistuksen täydellisyyttä. Poistetun materiaalin määrää arvioitiin

vertaamalla kappaleen massaa ennen prosessia ja sen jälkeen sekä laskemalla poistuneen materiaalin tilavuus.

Laserpuhdistusprosessin optimointi

Laserpuhdistusprosessin kehittämisessä keskityttiin menetelmän optimointiin ja energiatehokkuuden arviointiin. Tavoitteena oli löytää asetukset, joilla saavutetaan paras puhdistustulos mahdollisimman vähällä energialla ja ilman materiaalivaurioita. Testeissä tutkittiin muun muassa pulssitaajuuden, laserpisteen koon, pulssienergian ja fluenssin vaikutuksia puhdistuksen tehokkuuteen.

Prosessin optimointi tarkoittaa sitä, että laserpuhdistusmenetelmää kehitettiin mahdollisimman toimivaksi, tehokkaaksi ja turvalliseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa, että testattiin erilaisia asetuksia ja laitteita, jotta löydettiin paras tapa puhdistaa eri materiaaleja – esimerkiksi mikä lasersäteen teho, pulssitaajuus tai säteen koko tuottaa parhaan lopputuloksen ilman, että pinta vaurioituu. Tavoitteena oli saada puhdistus mahdollisimman tarkaksi ja tasaiseksi, mutta samalla nopeaksi ja helposti toistettavaksi teollisessa ympäristössä.

Energiatehokkuuden arviointi puolestaan tarkoittaa sitä, että mitattiin, kuinka paljon energiaa laserpuhdistus kuluttaa eri tilanteissa. Tämä on tärkeää, koska energian käyttö vaikuttaa suoraan kustannuksiin ja ympäristövaikutuksiin. Testeissä selvitettiin esimerkiksi, kuinka paljon energiaa tarvitaan tietyn pinnoitteen poistamiseen ja miten eri asetukset vaikuttavat kulutukseen. Samalla mitattiin myös, kuinka paljon pölyä tai jäämiä prosessissa syntyy ja kuinka tehokkaasti ne saadaan kerättyä talteen.

Työpaketissa jatkettiin laserpuhdistusprosessin kehittämistä ja optimointia erityisesti merenkulun teräsmateriaalien osalta. Spektrometrian turvin avulla seurattiin lasersäteen ja pinnoitteiden välistä vuorovaikutusta reaaliajassa. Tämä mahdollisti puhdistusprosessin tarkan hallinnan ja auttoi varmistamaan, ettei pohjamateriaali vaurioidu. Spektrometri toimi ikään kuin "silmänä", joka näkee pinnan muutokset tarkemmin kuin ihmissilmä. Se antaa tarkkaa tietoa siitä, mitä pinnalla tapahtuu, ja auttaa säätämään lasersäteen tehoa ja asetuksia oikein.

Laserpuhdistuksen energiankulutuksen ja vapautuneen pölynmäärän arviointi

Energiankulutusta eri pinnoiteyhdistelmien poistossa arvioitiin käyttämällä ennalta määritettyjä parametreja. Näiden parametrien avulla voitiin laskea, kuinka paljon energiaa kului, kun erilaisia pintamateriaaleja poistettiin. Huomioon otettiin muun muassa pulssitaajuus, laserpisteen halkaisija, pulssienergia ja fluenssi. Pulssitaajuus tarkoittaa sitä, kuinka monta kertaa laser lähettää valopulssin sekunnissa. Mitä korkeampi taajuus, sitä useammin "laseriskelmä" osuu pintaan, mikä voi nopeuttaa puhdistusta mutta myös lisätä energiankulutusta. Laserpisteen halkaisija viittaa siihen, kuinka leveä lasersäde on, kun se osuu pintaan. Pienempi piste tarkoittaa tarkempaa puhdistusta pienellä alueella, kun taas suurempi piste voi käsitellä laajempaa aluetta kerralla. Tämä vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti ja tehokkaasti pinta saadaan puhdistettua. Pulssienergia kertoo, kuinka paljon energiaa yksittäinen laserpulssi sisältää. Suurempi energia voi poistaa pinnoitteita tehokkaammin, mutta samalla se voi lisätä riskiä vaurioittaa pohjamateriaalia, jos ei olla varovaisia. Fluenssi tarkoittaa energiamäärää, joka osuu tietylle pinta-alalle. Se yhdistää pulssienergian ja laserpisteen koon, ja sen avulla voidaan arvioida, kuinka voimakas vaikutus lasersäteellä on puhdistettavaan pintaan.

Näiden tekijöiden mittaaminen ja analysointi auttoi optimoimaan laserpuhdistusprosessia – eli löytämään asetukset, joilla saadaan paras puhdistustulos mahdollisimman vähällä energialla ja ilman

materiaalivaurioita. Tämä on tärkeää teollisuudessa, jossa tehokkuus, turvallisuus ja energiansäästö ovat keskeisiä tavoitteita. Parametrien perusteella laskettiin energiankulutus eri pinnoiteyhdistelmien poistossa.

Samanaikaisesti arvioitiin pölynkeruun tehokkuutta laboratorioympäristössä käytetyn räätelöidyn keräysjärjestelmän avulla. Pölyn määrä ilmoitettiin grammoina, mikä tarjosi selkeää tietoa prosessin ympäristövaikutuksista. Pölynkeruun tehokkuuden mittaaminen oli tärkeää, koska pölyllä voi olla merkittäviä vaikutuksia sekä ympäristöön että työympäristön turvallisuuteen.

Laserpuhdistuksen seuranta ja arviointi useilla anturimenetelmillä

Laserpuhdistusta seurattiin reaaliaikaisesti kahdella anturitekniikalla: Cavitarin laserperustaisella kuvantamisella ja Xarionin akustisilla emissioantureilla. Cavitarin järjestelmä mahdollisti tarkan visuaalisen seurannan kirkkaassa ja haastavassa ympäristössä. Xarionin anturit mittasivat lasersäteen aiheuttamia värähtelyjä tarjoten tietoa puhdistuksen tasaisuudesta ja mahdollisista poikkeamista. Molemmat menetelmät toimivat ilman fyysistä kontaktia, mikä paransi turvallisuutta ja prosessin hallittavuutta.

Tuloksista saatiin arvokasta tietoa prosessin kokonaisvaikutuksista. Energiankulutuksen ja pölyn määrän perusteella voitiin arvioida, kuinka ympäristöystävällinen ja turvallinen kukin pinnoiteyhdistelmän poistomenetelmä oli. Näitä tietoja voidaan hyödyntää jatkossa, kun valitaan menetelmiä teollisiin prosesseihin tai kehitetään uusia, entistä tehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä ratkaisuja.

Näitä kahta anturitekniikkaa täydennettiin spektrometrillä ja pyrometrillä tehdyillä mittauksilla. Spektrometrin avulla mitattiin lasersäteen ja materiaalin vuorovaikutuksessa syntyvää säteilyä, kun taas pyrometri rekisteröi prosessin aikana syntyvän lämpötilan. Näiden mittausten avulla saatiin tarkkaa tietoa siitä, miten laser vaikuttaa eri materiaaleihin ja kuinka tehokkaasti puhdistus tapahtuu.

Yhdessä nämä toimenpiteet auttoivat varmistamaan, että laserpuhdistus ei ole vain teknisesti toimiva, vaan myös taloudellisesti ja ympäristön kannalta järkevä vaihtoehto. Kun prosessi on optimoitu ja energiaa käytetään tehokkaasti, menetelmä soveltuu paremmin teolliseen käyttöön, jossa vaaditaan luotettavuutta, turvallisuutta ja kestäväää toimintaa. Lisäksi menetelmät tukevat automaation ja laadunvalvonnan kehittämistä.

Laserpuhdistuksen soveltaminen monimateriaaliliitoksiin

Laboratoriotesteissä selvitettiin myös, miten laserpuhdistusta voitaisiin hyödyntää eri materiaalien yhdistämisessä eli monimateriaaliliitoksissa. Niitä tarvitaan esimerkiksi teollisuudessa, kun halutaan yhdistää metalli ja muovi tai kaksi erilaista metallia. Jotta nämä liitokset toimisivat hyvin, niiden pintojen täytyy olla puhtaita, tasaisia ja rakenteellisesti ehjiä ennen kuin ne liitetään yhteen.

Laserpuhdistus osoittautui tässä erittäin hyödylliseksi menetelmäksi, jonka avulla voitiin varmistaa, että liitospinnat olivat juuri sellaisia kuin tarvitaan: puhtaita, yhtenäisiä ja laadukkaita. Tämä paransi lopputuloksen kestävyyttä ja laatua, eli liitokset pysyivät paremmin kiinni ja kestivät enemmän rasitusta.

Kehitystyö antoi paljon uutta tietoa siitä, miten laserpuhdistusta voidaan tehdä entistä tarkemmin, energia- ja turvallisemmin. Tämä on tärkeää erityisesti teollisissa ympäristöissä, joissa prosessien täytyy olla luotettavia ja turvallisia työntekijöille.

Laserpuhdistus osoittautui joustavaksi menetelmäksi, joka sopii monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Sitä voidaan käyttää erilaisten materiaalien käsittelyyn, ja sen toimintaa voidaan hallita tarkasti. Tämä tekee siitä hyvän vaihtoehdon moniin teollisiin sovelluksiin, joissa vaaditaan korkeaa laatua ja tehokkuutta.

Yhteenvedona voidaan sanoa, että työpaketissa 3 tehty kehitystyö laajensi laserpuhdistuksen käyttömahdollisuuksia ja osoitti, että menetelmä sopii hyvin myös monimutkaisiin ja vaativiin liitostilanteisiin. Tulokset tukevat laserpuhdistuksen jatkokehitystä ja sen käyttöä tulevaisuuden teollisissa ratkaisuissa.

Tietoisuuden lisääminen ja turvallisuuskäytännöt

Hankkeen aikana järjestettiin useita työpajoja, demonstraatioita ja yrityshaastatteluja, joiden tarkoituksena oli kartoittaa, miten hyvin laserteknologiaa tunnetaan ja käytetään Suomessa. Näiden tilaisuuksien kautta saatiin arvokasta tietoa suoraan alan toimijoilta. Kävi myös ilmi, ettei laserteknologian osaaminen ollut vielä sillä tasolla kuin alun perin oli hanketta suunniteltaessa arvioitu. Monet yritykset olivat kyllä kiinnostuneita laserteknologian tarjoamista mahdollisuuksista, mutta käytännön osaaminen ja kokemus sen hyödyntämisestä olivat vielä rajallisia. Laserpuhdistus ja muut laserteknologian sovellukset koettiin usein uusiksi ja teknisesti haastaviksi, mikä hidasti niiden käyttöönottoa. Tämä osoitti, että alalla on selkeä tarve lisäkoulutukselle ja käytännönläheiselle tiedon jakamiselle.

Erityisesti turvallisuuskäytännöissä havaittiin suurta vaihtelua. Joissain yrityksissä lasersäteen käyttöön liittyvät turvallisuusohjeet ja suojavarusteet olivat hyvin hallussa, kun taas toisissa paikoissa niistä ei ollut riittävästi tietoa tai ne eivät olleet ajan tasalla. Tämä vaihtelu korosti sitä, että lasersäteen käyttöön liittyvä turvallisuustieto ei ole vielä vakiintunut osaksi kaikkien toimijoiden arkea.

Paljastui, että alalla on suuri tarve kehittää tietopaketteja, ohjeistuksia ja käytännön tukitoimia, joiden avulla laserteknologian käyttöä voitaisiin edistää turvallisesti ja tehokkaasti. Tiedon jakaminen eri toimijoiden välillä nähtiin tärkeänä keinona lisätä osaamista ja madaltaa kynnystä ottaa teknologia käyttöön.

Lisäksi havaittiin, että monilla yrityksillä oli kiinnostusta soveltaa laserteknologiaa omiin tuotantoprosesseihinsa, mutta he kaipasivat konkreettisia esimerkkejä ja näyttöä siitä, miten teknologia toimii käytännössä. Demonstraatiot ja pilotit osoittautuivat hyödyllisiksi, sillä niiden avulla voitiin näyttää laserteknologian toimintaa ja hyödyt selkeästi.

Tilannetta selventämään järjestettiin kaksi työpajaa, joiden tavoitteena oli lisätä alan yritysten tietoa laserteknologiasta ja sen mahdollisuuksista. Ensimmäinen oli *Laserturvallisuustyöpaja*, joka pidettiin 7.4.2025 KTK:n tiloissa. Siinä käsiteltiin lasertyöstön turvallisuusnäkökohtia, ja osallistujille esitettiin käytännön demonstraatio laserlaitteiden turvallisesta käytöstä sekä operaattorin ja lähiympäristön suojaamisesta asianmukaisesti.

Toinen tilaisuus oli 24.4.2025 järjestetty *Power and Precision* -webinaari. Webinaari pidettiin englanniksi, sillä pääpuhujat edustivat Saksan Fraunhofer-instituuttia, joka on yksi Euroopan johtavista laserteknologian tutkimus- ja kehityskeskuksista. Puhujat esittelivät laserteknologian teollisia sovelluksia, erityisesti puhdistuksessa ja pintojen muokkauksessa ja toivat esiin teknologian etuja, kuten tarkkuutta, kustannussäästöjä ja ympäristöystävällisyyttä.

Webinaarien ja työpajojen kautta yrityksille tarjottiin ajankohtaista ja käytännönläheistä tietoa laserteknologian kehityksestä sekä sen tulevaisuuden mahdollisuuksista. Tilaisuuksissa käsiteltiin muun muassa, miten laserteknologiaa voidaan hyödyntää tuotantoprosessien tehostamiseen, pintakäsittelyyn ja

ympäristöystävällisempään toimintaan. Yritykset saivat konkreettisia esimerkkejä ja näkemyksiä siitä, miten teknologiaa voidaan soveltaa omassa toiminnassa.

Tällainen tiedon jakaminen vahvisti paikallisen teollisuuden valmiuksia kehittää uusia ratkaisuja ja parantaa kilpailukykyään. Erityisesti korostui laserpuhdistusteknologian rooli tuotannon optimoinnissa ja kestävä kehityksen mukaisessa toiminnassa, kuten energiatehokkuuden ja materiaalien kierrätyksen edistämisessä. Tilaisuudet lisäsivät ymmärrystä teknologian mahdollisuuksista ja madalsivat kynnystä sen käyttöönottoon.

Yhteenveto

Toteutetut toimenpiteet osoittivat, että laserpuhdistus on tehokas, tarkka ja ympäristöystävällinen menetelmä pintojen esivalmisteluun, erityisesti vaativissa teollisissa olosuhteissa. Kehitystyö ja testaukset antoivat paljon kaivattua tietoa laserpuhdistuksen vaikutuksista eri materiaaleihin, sen energiatehokkuudesta ja turvallisuudesta. Pulssilaserlaitteen käyttö monikerroksisten pinnoitteiden poistossa osoittautui toimivaksi ratkaisuksi, ja prosessin optimointi mahdollisti entistä parempien tulosten saavuttamisen.

Reaaliaikainen prosessinseuranta, anturiteknologian hyödyntäminen ja energiamittaukset tukivat kehittämistyötä ja loivat pohjan laserpuhdistuksen laajemmalle soveltamiselle. Lisäksi tietoisuuden lisääminen ja turvallisuuskäytäntöjen vahvistaminen edistivät teknologian käyttöönottoa yrityksissä.

Toimenpiteiden perusteella voidaan todeta, että laserpuhdistus tarjoaa konkreettisia ratkaisuja teollisuuden pintakäsittelyhaasteisiin ja tukee kestävää, tehokasta ja turvallista tuotantoa. Toimenpiteet loivat vahvan perustan teknologian jatkokehitykselle ja sen laajemmalle hyödyntämiselle suomalaisessa teollisuudessa.

5. Työpaketti 4: Laserteknologian testaukset todellisessa käyttöympäristössä

Tavoitteet

Työpaketissa 4 ”*Laserteknologian testaukset todellisessa käyttöympäristössä*” oli tavoitteena testata laserpuhdistusteknologiaa todellisissa käyttöympäristöissä, erityisesti teollisissa olosuhteissa. Testaukset aloitettiin maalaushallissa, jossa olosuhteet ovat keskivaikeat. Tavoitteena oli selvittää, miten laserpuhdistus toimii erilaisten pintojen puhdistuksessa, kuten ruosteen ja muun lian poistossa ennen maalausta. Näissä testeissä arvioitiin muun muassa puhdistuksen tehokkuutta, tasaisuutta ja vaikutusta pintamateriaalin laatuun.

Laserpuhdistusta testattiin myös vaativia olosuhteita simuloivassa ympäristössä, kuten laivan sisällä. Laivaympäristö tuo mukanaan lisähaasteita, kuten rajallisen tilan, vaihtelevat pinnat ja tiukat turvallisuusvaatimukset. Näissä olosuhteissa korostuu erityisesti prosessin suojaaminen ja laitteiston toimintavarmuus.

Testien yhteydessä pyrittiin myös kiinnittämään huomiota siihen, miten laserpuhdistuslaitteet voidaan suojata pölyltä, lämmöltä ja muilta häiriötekijöiltä. Lisäksi tarkoituksena oli arvioida, miten järjestelmä toimii jatkuvassa käytössä ja miten sen huolto ja käyttö voidaan toteuttaa turvallisesti. Tavoitteena oli varmistaa, että laserpuhdistusmenetelmä soveltuu käytännön teollisiin tarpeisiin ja että se voidaan ottaa käyttöön tehokkaasti ja turvallisesti myös haastavissa ympäristöissä. Tulokset tukevat menetelmän jatkokehitystä kohti laajempaa teollista soveltamista.

Laserpuhdistuksen testaus simuloidussa teollisessa ympäristössä QTT:n laboratoriossa

Hankkeen alussa suunniteltiin kokeita, joiden avulla laserpuhdistuksen soveltuvuutta voitiin arvioida käytännössä. Alkuperäisen suunnitelman mukaan testit oli tarkoitus toteuttaa kahdessa eri ympäristössä: keskivaikeissa olosuhteissa maalaushallissa ja vaikeissa olosuhteissa laivaympäristössä.

Laserpuhdistuksen kehitystyötä tehtäessä todettiin, ettei puhdistuksen toteuttaminen laivan sisällä ole käytännössä mahdollista. Tämä johtuu siitä, että Suomessa laserpuhdistus on vielä uusi ala eikä laitteisiin ole saatavilla riittäviä turvaominaisuuksia, jotka mahdollistaisivat turvallisen käytön suljetussa ja haastavassa ympäristössä, kuten laivan sisätiloissa. Tämän vuoksi ei testaaminen todellisissa laivaolosuhteissa ollut mahdollista, ja siksi päätettiin simuloida molemmat olosuhteet koehallissa. Simulointi mahdollisti olosuhteiden hallitun jäljittelyn, jolloin testitulokset saatiin luotettavasti ja turvallisesti. Erityistä huomiota kiinnitettiin epäpuhtauksien, kuten ruosteen ja öljyn, poistoon sekä prosessien suojaamiseen ja järjestelmän hallintaan.

Laserteknologian testaukset todellisessa käyttöympäristössä toteutettiin hankkeessa laboratorio-olosuhteissa QTT:llä (Quad Tech Turku, entinen Koneteknologiakeskus Turku, KTK). Koska laserpuhdistusta haluttiin kehittää teollisiin käyttötarkoituksiin, oli tärkeää, että testausympäristö vastasi mahdollisimman hyvin todellisia olosuhteita, kuten telakoita, tuotantolinjoja tai huoltotiloja. Tämän vuoksi laboratorioon rakennettiin simuloitu käyttöympäristö, jossa voitiin hallitusti testata laserpuhdistuksen toimivuutta, turvallisuutta ja tehokkuutta.

Simuloitu ympäristö suunniteltiin niin, että se jäljitteli teollisen työtilan rakenteita, valaistusta, ilmanvaihtoa ja pintamateriaaleja. Testialustaksi valittiin materiaaleja, joita käytetään yleisesti teollisuudessa, kuten korkealujuusteräksiä, lasia ja ruostumatonta terästä. Näihin materiaaleihin lisättiin erilaisia pinnoitteita ja

jäämiä, kuten maaleja, polymeerejä ja elintarvikkejäämiä, jotta voitiin testata laserpuhdistuksen soveltuvuutta eri tilanteisiin.

Laserpuhdistuksen reaaliaikainen seuranta simuloitussa ympäristössä teollisia sovelluksia varten

Simuloituun ympäristöön asennettiin lisäksi mittalaitteita ja antureita, kuten akustisia emissioantureita (Xarion), spektrometrejä ja lämpötilamittareita, joiden avulla voitiin seurata puhdistusprosessia reaaliajassa. Näiden avulla saatiin tarkkaa tietoa siitä, miten laser reagoi eri materiaaleihin ja pinnoitteisiin, ja voitiin arvioida puhdistuksen laatu sekä mahdolliset riskit.

Simuloitu ympäristö mahdollisti turvallisen ja hallitun testauksen, jossa voitiin toistaa samoja tilanteita ja vertailla eri laitteiden ja asetusten vaikutuksia. Tämä loi vahvan pohjan laserpuhdistuksen kehittämiseksi kohti käytännön teollisia sovelluksia.

Laserpuhdistus on nopeasti kehittyvä teknologia, joka tarjoaa ympäristöystävällisen ja tehokkaan vaihtoehdon perinteisille pintakäsittelymenetelmille. Työpaketissa 4 keskityttiin laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen soveltuvuuden arviointiin erityisesti teollisissa olosuhteissa. Tavoitteena oli selvittää, miten menetelmää voidaan hyödyntää pintojen esikäsittelyssä ennen maalausta sekä testata sen vaikutuksia materiaalien kestävyteen ja prosessien laatuun.

Taustaselvitys laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen tueksi

Ennen käytännön testien aloittamista suoritettiin kattava taustaselvitys, jonka avulla haluttiin varmistaa, että laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen kokeet perustuvat ajankohtaiseen ja luotettavaan tietoon. Tässä toimenpiteessä käytiin läpi aiempia julkaisuja, teknisiä raportteja ja käytännön sovelluksia, joissa laserteknologiaa oli hyödynnetty pintakäsittelyssä. Erityisesti keskityttiin metallipintojen käsittelyyn, sillä ne ovat keskeisessä roolissa meriteollisuudessa, konepajateollisuudessa ja muissa vaativissa teollisuusympäristöissä.

Laserpuhdistuksen osalta selvitettiin, millaisia epäpuhtauksia menetelmällä voidaan poistaa tehokkaasti ja millaisia vaikutuksia sillä on materiaalin pintarakenteeseen. Kiillotuksen kohteena olivat erityisesti ruoste, öljy ja vanhat maalikerrokset, jotka voivat heikentää liitosten laatua tai estää uuden pinnoitteen tarttumisen. Laserteknologian kyky poistaa nämä epäpuhtaudet ilman kemikaaleja tai mekaanista kulutusta nähtiin merkittävänä etuna.

Laserkiillotuksen osalta haluttiin kehittää sitä, miten menetelmä vaikuttaa pinnan tasaisuuteen, korroosionkestävyyteen ja visuaaliseen laatuun. Kiillotuksen avulla voidaan parantaa materiaalin käyttöikää ja ulkonäköä, mikä on tärkeää esimerkiksi hitsausseamien viimeistelyssä tai näkyvien pintojen käsittelyssä.

Taustaselvityksen tulokset loivat vahvan pohjan käytännön testien suunnittelulle. Niiden avulla voitiin määrittää sopivat testimateriaalit, valita oikeat laitteistot ja suunnitella mittausmenetelmät, joilla laserprosessien vaikutuksia voidaan arvioida luotettavasti. Samalla tunnistettiin kehityskohteita, jotka ohjasivat menetelmän jatkokehitystä ja teollista soveltamista.

Käytetyt materiaalit sekä testausmenetelmät laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen arvioinnissa

Laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen toimivuutta arvioitaessa käytettiin huolellisesti valittuja metallinäytteitä, jotka edustavat tyypillisiä materiaaleja meriteollisuudessa ja teollisessa valmistuksessa. Näytteiksi valittiin

erityisesti EH36-laivateräs, joka on yleisesti käytetty hitsatuissa rakenteissa, sekä 316L ruostumaton teräs, joka oli valmistettu lisäävällä valmistuksella eli laser powder bed fusion -menetelmällä (PBF-LB/M).

EH36 on vahvaa ja kestävä terästä, jota käytetään laivanrakennuksessa. Se kestää hyvin painetta, iskuja ja korroosiota, ja soveltuu erityisesti laivojen runkojen ja kansien valmistukseen. Teräs täyttää kansainväliset lujuusvaatimukset, ja sen hitsattavuus sekä korroosionkestävyys tekevät siitä sopivan merellisiin olosuhteisiin. Pintakäsittelyillä, kuten laserpuhdistuksella, sen ominaisuuksia voidaan parantaa entisestään.

316L-ruostumaton teräs kestää hyvin korroosiota ja kemiallista kulumista, minkä vuoksi se soveltuu erinomaisesti merellisiin olosuhteisiin. Teräksessä on vähän hiiltä, mikä parantaa sen hitsattavuutta ja vähentää ruostumisriskiä hitsauksen jälkeen. Tässä hankkeessa materiaali valmistettiin lisäävällä valmistuksella eli laserpohjaisella jauhepetisulatuksella (PBF-LB/M), jossa metallijauhe sulatetaan kerros kerrokselta lasersäteellä. Menetelmä mahdollistaa tarkkojen ja kevyiden osien valmistuksen ilman muotteja, mikä on hyödyllistä laivanrakennuksessa, erityisesti vaikeasti saavutettavien ja kulutukselle altistuvien osien kohdalla. Laserilla valmistetut 316L-osat kestävät paremmin meriveden aiheuttamaa räsytystä ja voivat vähentää huollon tarvetta sekä parantaa energiatehokkuutta kevyemmän rakenteen ansiosta.

Laserpohjaisia menetelmiä testattiin, jotta voitaisiin parantaa metallipintojen laatua ennen ja jälkeen hitsauksen. Erityisesti keskityttiin EH36-laivateräkseen, jota käytetään laivojen runkojen ja muiden kantavien rakenteiden valmistuksessa. Ennen hitsausta EH36-levyt puhdistettiin lasersäteellä liasta, rasvasta ja öljystä. Tämän jälkeen, kun hitsaus oli tehty, hitsisaumat kiilloitettiin lasersäteellä, jotta saumat olisivat tasaisia, kestäviä ja korroosionkestäviä. Samaan aikaan testattiin myös 316L ruostumatonta terästä, joka oli valmistettu lisäävällä valmistuksella eli 3D-tulostuksen kaltaisella menetelmällä. Tämä materiaali kiilloitettiin lasersäteellä, jotta sen pinta saataisiin mahdollisimman tasaiseksi ja kestäväksi ilman mekaanista hiontaa. Tavoitteena oli selvittää, voiko lasersäteellä parantaa pintojen laatua niin, että ne kestävät paremmin meriveden aiheuttamaa korroosiota, joka on yksi suurimmista haasteista laivanrakennuksessa. Korroosio voi heikentää hitsisaumoja ja johtaa rakenteellisiin vaurioihin, mikä puolestaan voi aiheuttaa kalliita korjauksia tai jopa vaaratilanteita.

Laserpuhdistus ja -kiillotus vaihtoehtona perinteisille menetelmille

Perinteisesti metallipintoja on puhdistettu hiekkapuhalluksella, jossa pinnalle ammutaan kovalla paineella hiekkaa tai muuta hioma-ainetta. Vaikka menetelmä on tehokas, se voi vahingoittaa pohjamateriaalia, tuottaa paljon pölyä ja jätettä ja vaatii suojavarusteita sekä suljettuja tiloja. Laserpuhdistus sen sijaan toimii ilman kosketusta eikä se kuluta materiaalia. Lasersäde poistaa vain epäpuhtaudet, kuten öljyn ja ruosteen, jättäen pohjan ehjäksi. Lisäksi laserpuhdistus ei tuota sekundääristä jätettä, mikä tekee siitä ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon. Laserkiillotus puolestaan sulattaa metallin pintakerroksen, joka tasoittuu ja jäähmettyy nopeasti. Tämä tekee pinnasta sileän ja tiiviin, mikä vähentää korroosion riskiä ja parantaa visuaalista laatua. Esimerkiksi laivan rungon hitsisaumat voidaan kiillottaa lasersäteellä niin, että ne kestävät paremmin meriveden räsytystä ja näyttävät siistimmiltä.

Laivanrakennuksessa laserpuhdistusta voidaan käyttää esimerkiksi ennen maalausta, jolloin maalipinta tarttuu paremmin puhtaaseen pintaan. Hitsauksen jälkeen laserkiillotus voi parantaa saumojen laatua, mikä vähentää huoltotarvetta ja pidentää rakenteiden käyttöikää. 316L-teräksestä valmistetut osat, kuten putkitot, venttiilit tai kiinnikkeet, voidaan valmistaa monimutkaisina muotoina lisäävällä valmistuksella ja viimeistellä lasersäteellä. Tämä mahdollistaa kevyemmät ja tarkemmat rakenteet, jotka kestävät meriveden räsytystä ja säästävät tilaa sekä painoa aluksissa.

Laserpuhdistus ja -kiillotus suoritettiin IPG YLPN -nanosekuntipulssilaserlaitteella, jonka keskimääräinen teho oli enintään 100 W. Lasersäteen aallonpituus vaihteli välillä 1055–1075 nm, ja prosessissa käytettiin eri pulssein kestoja ja tehoasetuksia. Laserpuhdistuksessa poistettiin epäpuhtauksia, kuten öljyä, likaa ja ruostetta, ilman että pohjamateriaali vaurioitui. Laserkiillotuksessa sulatettiin metallin pintakerros, joka tasoittui pintajännityksen vaikutuksesta ja jähmettyi nopeasti muodostaen tasaisen pinnan.

Laserpuhdistuksen sekä -kiillotuksen vaikutusten arviointi korroosio- ja pinnankarheusmittauksilla

Testausmenetelmät sisälsivät useita vaiheita. Ensin näytteet puhdistettiin lasersäteellä ja vertailun vuoksi myös perinteisellä menetelmällä, kuten sylinterimäisellä hiontalaitteistolla. Tämän jälkeen laserkiillotus suoritettiin sekä hitsausaumojen ylä- että alapuolelle EH36-näytteissä. Jauhepetisulatusmenetelmällä valmistetut 316L-näytteet käsiteltiin vain laserkiillotuksella.

Pintojen korroosionkestävyyttä arvioitiin käyttämällä Gamry Instrumentsin korroosiotestausjärjestelmää ja Iviumin elektrokemiallista analysaattoria. Gamry Instrumentsin laitteistoa käytetään mittaamaan, kuinka hyvin metallit kestävät korroosiota eli ruostumista ja kemiallista kulumista. Laite toimii niin, että metallinäyte upotetaan nesteeseen, joka jäljittelee esimerkiksi meriveden olosuhteita. Sitten siihen johdetaan pieni sähkövirta ja mitataan, miten materiaali reagoi. Tällä tavalla saadaan selville, kuinka nopeasti metalli alkaa hajota tai menettää ominaisuuksiaan, kun se altistuu korroosiolle. Tämä on erityisen tärkeää esimerkiksi laivanrakennuksessa, jossa rakenteet ovat jatkuvasti kosketuksissa suolaveden ja kosteuteen. Gamryn järjestelmä antaa tarkkaa tietoa siitä, kuinka tehokkaita eri pintakäsittelyt ovat, kuten laserpuhdistus tai laserkiillotus, ja miten ne vaikuttavat metallin kestävyyskykyyn. Iviumin analysaattori toimii samankaltaisella periaatteella kuin Gamryn laite, mutta se on monipuolinen mittaustilaite, jota käytetään sähkökemiallisten ominaisuuksien analysointiin. Se mittaa esimerkiksi, miten sähkö kulkee metallin pinnalla, miten se reagoi eri kemikaaleihin ja kuinka sen pinta muuttuu ajan myötä. Iviumin laitteella voidaan tutkia pinnan suojaavuutta, eli kuinka hyvin jokin käsittely, kuten laserkiillotus, estää korroosion syntymistä. Se auttaa myös arvioimaan, onko pinta tiivis ja tasainen vai onko siinä mikroskooppisia vaurioita, jotka voivat johtaa korroosioon. Näillä laitteilla mitattiin, kuinka hyvin käsitellyt pinnat kestivät korroosiota verrattuna käsittelemättömiin tai perinteisesti puhdistettuihin pintoihin.

Pintojen karheus mitattiin Bruker Alicona Infinite Focus G6 -laitteella, joka tuotti tarkkoja kolmiulotteisia mittaustuloksia pinnan tasaisuudesta. Lisäksi suoritettiin visuaalisia tarkasteluja mikroskooppikuvien avulla, joiden avulla voitiin havaita mahdolliset jäämät, vauriot tai epätasaisuudet. Bruker Alicona Infinite Focus G6 on erikoislaitte, jolla voidaan mitata metallipintojen karheutta ja tasaisuutta erittäin tarkasti. Laite käyttää optiikkaa ja kameraa, jotka ottavat kolmiulotteisia kuvia pinnasta. Kuvien avulla voidaan nähdä, kuinka tasainen tai epätasainen pinta on – jopa mikroskooppisen pienet kohoumat ja kuopat voidaan havaita. Tämä on tärkeää esimerkiksi silloin, kun halutaan tietää, kuinka hyvin laserpuhdistus tai -kiillotus on onnistunut. Jos pinta on hyvin tasainen, se kestää paremmin korroosiota ja näyttää siistimmältä. Laite antaa lukuarvoja, jotka kertovat, kuinka karhea pinta on, ja näitä arvoja voidaan verrata ennen ja jälkeen käsittelyn. Lisäksi tehtiin visuaalisia tarkasteluja mikroskoopin avulla. Tämä tarkoittaa, että metallipintoja katsottiin suurennettuna, jotta voitiin nähdä mahdolliset jäämät, vauriot tai epätasaisuudet, joita ei paljaalla silmällä huomaisi. Esimerkiksi jos pinnalle on jäänyt öljyä, likaa tai pieniä halkeamia, ne voidaan havaita mikroskooppikuvista. Mikroskooppitarkastelu auttaa varmistamaan, että laserpuhdistus on poistanut kaikki epäpuhtaudet ja että pinta on kunnossa esimerkiksi hitsausta tai maalausta varten. Se toimii ikään kuin laatutarkastuksena, joka täydentää mittaustilaitteen antamaa numeerista tietoa.

Laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen optimointi laserpuhdistuslaitteen säätöarvojen avulla

Laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen tehokkuus riippuu paljon siitä, millaisia asetuksia laitteelle käytetään. Testien aikana kokeiltiin erilaisia säätöjä, jotta löydettäisiin ne arvot, joilla saadaan paras lopputulos metallipintojen käsittelyssä.

Laserpuhdistuksessa parhaat tulokset saavutettiin, kun käytettiin 25 watin keskimääräistä tehoa ja 75 nanosekunnin pulssin kesto. Tämä tarkoittaa, että lasersäde oli riittävän voimakas poistamaan epäpuhtaudet, kuten öljyn ja ruosteen, mutta ei niin voimakas, että se olisi vahingoittanut metallin pintaa. Pulssin kesto kertoo, kuinka kauan lasersäde vaikuttaa yhteen kohtaan – tässä tapauksessa lyhyt mutta tehokas pulssi toimi parhaiten. Laserkiillotuksessa taas parhaaksi yhdistelmäksi osoittautui 75 watin teho ja 25 nanosekunnin pulssi. Kiillotuksessa tarkoituksena oli sulattaa metallin pintakerros kevyesti, jolloin se tasoittuu ja jäähmettyy uudelleen sileäksi pinnaksi. Suurempi teho ja lyhyempi pulssi auttoivat saavuttamaan tasaisen ja kiiltävän lopputuloksen ilman, että pinta vaurioitui. Molemmissa prosesseissa käytettiin 450 millimetrin sekuntinopeutta eli lasersäde liikkui käsiteltävän pinnan yli melko nopeasti. Lisäksi pulssitaajuus oli 10 000 pulssia sekunnissa (10 kHz), mikä tarkoittaa, että laser antoi hyvin tiheitä ja tasaisia valopulseja. Tämä auttoi varmistamaan, että koko pinta käsiteltiin tasaisesti.

Jokainen näyte käsiteltiin kuusi kertaa eli laserprosessia toistettiin useita kierroksia, jotta saatiin aikaan haluttu puhtaus ja tasaisuus. Näin varmistettiin, että tulokset olivat luotettavia ja että menetelmä toimii myös käytännön teollisissa olosuhteissa. Näiden menetelmien avulla saatiin kattava kuva siitä, miten laserpuhdistus ja -kiillotus vaikuttavat metallipintojen ominaisuuksiin, kuten puhtauteen, tasaisuuteen ja korroosionkestävyyteen.

Laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen kehittämisen tulokset

Kehittämistoimenpiteiden tavoitteena oli selvittää, miten laserpuhdistusta voidaan hyödyntää metallipintojen puhdistuksessa ennen ja jälkeen hitsauksen sekä miten laserkiillotus vaikuttaa pintojen tasaisuuteen ja korroosionkestävyyteen.

Kiillotuksen jälkeen pinnat olivat selvästi tasaisempia ja heijastivat valoa paremmin. Mikroskooppikuvissa näkyi, että hitsisaumoista oli poistunut pinnan epätasaisuuksia, kuten roiskeita ja aaltoilua.

Pintojen karheutta mitattiin optisella laitteella, ja tulokset osoittivat, että laserpuhdistetut pinnat olivat 36 % tasaisempia kuin perinteisesti puhdistetut. Laserkiillotetut pinnat olivat vielä 22 % tasaisempia kuin pelkästään laserpuhdistetut. Tämä tarkoittaa, että laserkiillotus paransi pintojen laatua entisestään.

Korroosionkestävyyttä arvioitiin suolaliuoksessa, ja tulokset olivat osittain vaihtelevia. Joissain tapauksissa laserpuhdistetut pinnat kestivät korroosiota paremmin kuin perinteisesti puhdistetut, mutta toisissa ero ei ollut selvä. Laserkiillotetut pinnat kuitenkin osoittivat keskimäärin parempaa korroosionkestävyyttä, erityisesti 316L-materiaalissa, jossa korroosio väheni 31 % verrattuna käsittelemättömään pintaan.

Kehittämisen perusteella voidaan todeta, että laserpuhdistus on tehokas menetelmä metallipintojen puhdistamiseen, ja laserkiillotus parantaa pintojen tasaisuutta ja korroosionkestävyyttä. Molemmat menetelmät tarjoavat selkeitä etuja perinteisiin menetelmiin, kuten hiekkapuhallukseen, erityisesti meriteollisuuden vaativissa olosuhteissa.

Laserpuhdistuksen kokeilujakso Rauman telakalla

Yksi hankkeen sprintti eli nopea ja intensiivinen kokeilujakso, toteutettiin Rauman telakalla, jossa laserpuhdistusteknologian käytännön toimivuutta testattiin teollisessa ympäristössä. Sprintin tarkoituksena oli tuottaa nopeasti konkreettista tietoa siitä, miten laserpuhdistus toimii todellisissa olosuhteissa ja millaisiin käyttökohteisiin se voisi soveltua.

Tilaisuudessa kolme suomalaista yritystä – Helminen Oy, TP-Cleantech Oy ja FMS-Service Oy – esittelivät omia laserpuhdistusratkaisujaan. Yritykset toteuttivat reaaliaikaisia demonstraatioita, joissa käsiteltiin telakan näytekappaleita lasersäteen avulla. Puhdistettavina kohteina olivat muun muassa ruosteiset pinnat, vanhat maalikerrokset ja hitsausroiskeet, jotka ovat tyypillisiä haasteita telakkateollisuudessa.

Testit suoritettiin yritysten omilla laitteilla, mikä mahdollisti sen, että laserpuhdistuksen toimivuutta voitiin arvioida aidossa teollisessa ympäristössä. Osallistujat pääsivät seuraamaan työstöä paikan päällä ja keskustelemaan tuloksista sekä teknologian soveltuvuudesta eri käyttötarkoituksiin.

Kokeilujakson aikana saatiin arvokasta palautetta menetelmän käytettävyydestä, eli kuinka helppoa ja nopeaa laitteiden käyttö oli työntekijöille. Lisäksi arvioitiin tehokkuutta, eli kuinka hyvin lasertyöstö poisti epäpuhtaudet, ja turvallisuutta, kuten lasersäteen hallintaa ja suojarusteiden tarvetta.

Sprintti osoitti, että laserpuhdistus soveltuu hyvin teollisiin puhdistustarpeisiin, erityisesti silloin kun halutaan tarkkaa, ympäristöystävällistä ja automatisoitavaa pintakäsittelyä. Tulokset tukivat teknologian jatkokehittämistä ja laajempaa käyttöönottoa telakkateollisuudessa ja muissa vaativissa ympäristöissä.

Innovaatioympäristön rakentaminen QTT:llä

Työpaketti 4:n toteutuksessa keskityttiin teollisen ympäristön realistiseen simulointiin Quad Tech Turun (QTT, entinen Koneteknologiakeskus Turku KTK) tiloissa, osana MALAMA-investointihanketta. Hankkeen keskeisenä tavoitteena oli kehittää laserpuhdistusteknologian innovaatioympäristö, joka tukee uusien ratkaisujen kehittämistä, testaamista ja kaupallistamista yhteistyössä yritysten, tutkimuslaitosten, julkisen sektorin ja loppukäyttäjien kanssa.

Laserpuhdistuksen osalta pyrittiin erityisesti luomaan kokeilu- ja pilotointiympäristö, jossa voidaan kehittää kehittyviä lasertekniikoita ja jakaa osaamista eri toimijoiden kesken. Tätä varten rakennettiin räätälöity laserpuhdistussolu, joka jäljitteli telakoiden olosuhteita mahdollisimman tarkasti. Solussa käytettiin siirrettäviä suojaerohoja ja muita rakenteita, jotka mahdollistivat turvallisen ja joustavan työskentelyn erilaisissa kohteissa. Näin saatiin aikaan realistinen testialusta, jossa laserpuhdistusmenetelmää voitiin kehittää ja testata tehokkaasti.

Testialustan avulla voitiin verifioida MALAMA-innovaatioympäristön toiminnallisuus. Innovaatioympäristö koostui investointihankkeen kautta hankituista laserlaitteista, antureista ja suojausjärjestelmistä, jotka yhdessä muodostivat turvallisen ja monipuolisen alustan teknologian kehittämiselle. Ympäristön ytimessä oli kannettava pulssilaserpuhdistuslaite, joka soveltui erityisesti meriteollisuudessa käytettävien EH36 -meriterästen puhdistamiseen. Tämä laite mahdollisti menetelmän testaamisen aidossa käyttöympäristössä, mikä oli tärkeää menetelmän validoinnin ja jatkokehityksen kannalta.

Innovaatioympäristön keskeinen osa oli sen kehittynyt anturointi. Järjestelmään sisällytettiin kaksi pyrometriä (AST A150 ja AST A250), joiden avulla voitiin seurata materiaalin lämpötilaa reaaliaikaisesti laajalla mittausalueella (75–3000 °C). Tämä lämpötiladata oli olennainen prosessin hallinnan, materiaalien käyttäy-

tymisen ymmärtämisen ja laadunvarmistuksen kannalta. Lisäksi ympäristöön kuului pölyn- ja jätteenkeräysjärjestelmä, joka tuki puhdasta ja turvallista työskentelyä, sekä DSLR-kamera, jolla dokumentoitiin puhdistustuloksia visuaalisesti. Näiden työkalujen avulla voitiin analysoida prosessin tehokkuutta ja kehittää menetelmiä edelleen.

Yhteistyö tutkimuksen ja teollisuuden välillä oli ratkaisevaa innovaatioympäristön kehittämisessä. Käyttäjäorganisaatioiden palaute prototyypeistä oli keskeinen osa kehitysprosessia, ja se mahdollisti ratkaisujen jatkuvan parantamisen. Rahoituskanavat, kuten EU Horizon, Business Finland ja rakennerahastot, mahdollistavat myös tämän hankkeen jälkeisen kehitystyön.

Kokonaisuudessaan MALAMA-hankkeessa kehitetty laserpuhdistuksen innovaatioympäristö tarjoaa joustavan, turvallisen ja tehokkaan alustan uuden teknologian tutkimukselle, pilotoinnille ja kaupallistamiselle. Se tukee erityisesti suomalaisen meriteollisuuden tarpeita ja toimii esimerkkinä siitä, miten monialainen yhteistyö voi edistää kestävää teknologista kehitystä.

Monikerroksisten maalien poisto

Laivojen ja muiden meriteollisuuden rakenteiden kunnossapito edellyttää säännöllistä pintakäsittelyä, jotta rakenteet säilyvät toimintakuntoisina ja kestävät vaativia meriolosuhteita. Pintakäsittelyyn kuuluu olennaisena osana vanhojen maalikerrosten poistaminen ja uusien suojaavien pinnoitteiden lisääminen. Perinteisesti maalinpoisto on toteutettu hiekkapuhalluksella, joka on tehokas mutta samalla karkea menetelmä. Se voi vaurioittaa teräspintaa, aiheuttaa merkittäviä ympäristöhaittoja ja tuottaa suuria määriä jätettä, mikä lisää kustannuksia ja vaatii erityisjärjestelyjä.

Viime vuosina on kehitetty uusia menetelmiä, jotka tarjoavat vaihtoehtoja perinteisille puhdistustekniikoille. Yksi lupaavimmista on laserpuhdistus, joka mahdollistaa maalikerrosten poistamisen ilman mekaanista kosketusta tai kemiallisia aineita. Laserpuhdistus perustuu ablaatioon eli ilmiöön, jossa lasersäteen energia kohdistuu maalipintaan aiheuttaen sen nopean kuumenemisen, höyrystymisen ja osittaisen ionisoitumisen. Tämä prosessi mahdollistaa kerroksittaisen puhdistuksen tarkasti ja hallitusti, ilman että teräspintaan kohdistuu mekaanista rasitusta tai lämpövaurioita – edellyttäen, että prosessiparametrit on säädetty oikein.

Hankkeessa selvitettiin laserpuhdistuksen soveltuvuutta EH36-teräslevyihin, joita käytetään yleisesti laivanrakennuksessa. Tutkimuksessa käytetyt teräslevyt oli maalattu epoksipohjaisilla pinnoitteilla, jotka ovat meriteollisuudessa yleisiä niiden hyvän korroosionkeston ja kulutuksenkestävyyden vuoksi. Puhdistus suoritettiin IPG:n 100 watin pulssilaserlaitteella, jonka aallonpituus oli 1064 nanometriä. Käytetyt parametrit olivat: 25 nanosekunnin pulssin kesto, 100 kHz:n taajuus, 450 mm/s skannausnopeus ja 25 W teho. Puhdistus toistettiin joko neljä tai kahdeksan kertaa, riippuen näytteen maalikerrosten määrästä.

Puhdistuksen jälkeen näytteet analysoitiin monipuolisesti. Visuaalisen tarkastelun lisäksi käytettiin optista mittalaitetta (Bruker Alicona Infinite Focus G6) ja röntgendiffraktiota (XRD), joilla voitiin arvioida puhdistuksen tarkkuutta ja vaikutuksia teräspinnan rakenteeseen. Tulokset olivat erittäin lupaavia: kaikki maalikerrokset saatiin poistettua kokonaan eikä teräspintaan syntynyt vaurioita. XRD-analyysi osoitti, että puhdistetuissa pinnoissa ei ollut jäljellä epoksimaalille tyypillisiä amorfisia piirteitä ja diffraktioprofiili vastasi hiekkapuhalletun referenssipinnan rakennetta.

Yksi tärkeä arviointikriteeri laserpuhdistuksessa on pinnan karheus, joka vaikuttaa muun muassa uuden maalipinnan tarttuvuuteen. Tutkimuksessa havaittiin, että suurimmassa osassa näytteistä pinnan karheus säilyi lähes ennallaan puhdistuksen jälkeen. Poikkeuksena oli näyte, jossa oli neljä maalikerrosta ja kahdeksan puh-

distuskierrosta – siinä karheus laski noin 8,8 %. Tämä viittaa mahdolliseen pinnan sulamiseen, mikä korostaa prosessiparametrien tarkan säädön merkitystä. Liiallinen energiansyöttö tai liian monta puhdistuskierrosta voi johtaa ei-toivottuihin muutoksiin teräspinnassa.

Laserpuhdistuksen tarkkuus, ympäristöystävällisyys ja turvallisuus teollisessa käytössä

Laserpuhdistuksen etuna on sen tarkkuus ja hallittavuus. Kun prosessia ohjataan oikein, lasersäteen energia absorboituu pääasiassa maalikerrokseen eikä lämpö siirry haitallisesti pohjamateriaaliin. Tämä mahdollistaa sen, että teräksen alkuperäinen rakenne ja pinnan laatu säilyvät. Puhdistetut pinnat voidaan maalata uudelleen ilman hiekkapuhallusta, mikä säästää aikaa, vähentää työvaiheita ja pienentää ympäristökuormitusta.

Menetelmä tarjoaa myös ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon perinteisille menetelmille. Koska laserpuhdistuksessa ei käytetä hiekkaa, kemikaaleja tai vettä, syntyy vähemmän jätettä ja pölyä. Tämä tekee menetelmästä erityisen houkuttelevan esimerkiksi telakoilla ja korjauspisteissä, joissa jätteiden käsittely ja ympäristönsuojelu ovat keskeisiä haasteita.

On kuitenkin tärkeää huomioida, että laserpuhdistus vaatii huolellista turvallisuussuunnittelua, erityisesti suljetuissa tiloissa tai merellä. Laserteknologian käyttöön liittyy riskejä, kuten silmävauriot, höyryjen muodostuminen ja mahdollinen räjähdysvaara, jos prosessia ei hallita asianmukaisesti. Tarvitaan suojaverhoja, tehokkaita höyryjen poistojärjestelmiä ja riskienhallintaa, jotta menetelmää voidaan käyttää turvallisesti eri ympäristöissä.

Tulevaisuudessa olisi tärkeää tutkia laserpuhdistuksen vaikutuksia teräksen mikrorakenteeseen tarkemmin, esimerkiksi elektronimikroskopian avulla. Näin voidaan varmistaa, ettei puhdistusmenetelmä aiheuta mikroskooppisia muutoksia, jotka voisivat vaikuttaa materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin tai pitkäaikaiskestävyyteen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että laserpuhdistus on lupaava ja tehokas menetelmä meriteollisuuden pintakäsittelyyn. Se mahdollistaa tarkat ja turvalliset puhdistustoimenpiteet, säilyttää materiaalin laadun ja vähentää ympäristövaikutuksia. Kun menetelmä otetaan käyttöön oikein suunniteltuna ja hallittuna, se voi merkittävästi parantaa huoltotoimien tehokkuutta ja kestävyyttä meriteollisuudessa.

Tiedon jakaminen ja osaamisen kehittäminen

Laserpuhdistusteknologian kehittäminen ei ole pelkästään tekninen prosessi – se vaatii myös vahvaa yhteistyötä, jatkuvaa oppimista ja tiedon avointa jakamista eri toimijoiden välillä. MALAMA-hankkeen työpaketti 4:n yhteydessä korostui erityisesti tarve vahvistaa osaamista ja lisätä tietoisuutta laserpuhdistuksen mahdollisuuksista, turvallisuudesta ja käytännön sovelluksista teollisessa ympäristössä.

Yksi keskeinen toimenpide oli laserturvallisuuteen keskittyvä työpaja, joka järjestettiin 7.4.2025. Tilaisuudessa käsiteltiin laserteknologian käyttöön liittyviä riskejä, suojautumismenetelmiä ja turvallisuusstandardeja. Osallistujat saivat käytännön tietoa siitä, miten laserlaitteita voidaan käyttää turvallisesti erilaisissa teollisissa olosuhteissa. Tämä oli erityisen tärkeää, sillä laserpuhdistusmenetelmät yleistyvät nopeasti, ja niiden turvallinen käyttö vaatii tarkkaa osaamista.

Toinen merkittävä tilaisuus oli webinaari nimeltä ”Precision and Power”, joka järjestettiin 24.4.2025. Webinaarissa esiteltiin laserpuhdistuksen ja -muokkauksen teknologioita sekä niiden sovelluksia eri teollisuudenaloilla. Tapahtuma tarjosi osallistujille mahdollisuuden kuulla alan asiantuntijoiden näkemyksiä, tutustua

uusimpiin innovaatioihin ja keskustella käytännön kokemuksista. Webinaari edisti osaamisen kehittymistä ja loi pohjaa uusille yhteistyömahdollisuuksille tutkimuksen ja teollisuuden välillä.

Tiedon jakaminen ei rajoittunut pelkästään yksittäisiin tapahtumiin. MALAMA-hankkeen aikana pyrittiin aktiivisesti rakentamaan ekosysteemiä, jossa tieto kulkee avoimesti eri organisaatioiden välillä. Tämä mahdollisti sen, että uudet ratkaisut ja menetelmät eivät jää vain yksittäisten toimijoiden käyttöön, vaan ne voivat hyödyttää laajemmin koko teollisuutta. Käyttäjäorganisaatioiden palaute, tutkimuslaitosten asiantuntemus ja yritysten käytännön kokemus yhdistyivät, mikä loi vahvan perustan teknologian kehittämiseksi ja kaupallistamiselle.

Osaamisen kehittäminen on jatkuva prosessi, ja sen merkitys korostuu erityisesti uusien teknologioiden käyttöönotossa. MALAMA-hankkeen toimenpiteet osoittivat, että kun tieto ja osaaminen jaetaan avoimesti, syntyy parempia ratkaisuja, turvallisempia toimintatapoja ja tehokkaampaa kehitystyötä. Laserpuhdistuksen osalta tämä tarkoittaa menetelmän tarkempaa hallintaa, parempaa energiatehokkuutta ja laajempaa sovellettavuutta eri teollisuudenaloilla.

Yhteenveto

MALAMA-hankkeessa laserpuhdistuksen soveltuvuutta testattiin simuloidussa teollisessa ympäristössä, koska alkuperäiset testit laivassa eivät olleet mahdollisia. Maalaushallissa toteutetut kokeet jäljittelivät telakoiden ja tuotantotilojen olosuhteita keskittyen erityisesti ruosteen ja öljyn poistoon sekä prosessin suojaamiseen. Simuloitu testiympäristö mahdollisti turvallisen ja toistettavan arvioinnin, joka tuotti luotettavaa tietoa menetelmän tehokkuudesta ja laadusta.

Ennen käytännön testejä tehtiin taustaselvitys laserpuhdistuksen ja -kiillotuksen soveltuvuudesta metallipintojen käsittelyyn. Testeissä käytettiin EH36-laivaterästä ja 316L ruostumatonta terästä. EH36-teräksessä laser poisti epäpuhtaudet ennen hitsausta ja kiillotus paransi sauman tasaisuutta ja korroosionkestävyyttä. 316L-teräs testattiin lisäävällä valmistuksella tuotettuna, ja sen pinta viimeisteltiin lasersäteellä ilman mekaanista hiontaa.

Laserpohjaiset menetelmät osoittautuivat tehokkaiksi ja ympäristöystävällisiksi. Testaukset tehtiin IPG YLPN-pulssilaserlaitteella, ja prosessia arvioitiin eri asetuksilla. Korroosiotesteissä laserkiillotetut pinnat kestivät korroosiota keskimäärin 31 % paremmin kuin käsittelemättömät pinnat. Rauman telakalla toteutettu sprintti vahvisti menetelmän käytännön soveltuvuutta.

Työpaketissa 4 rakennettiin Quad Tech Turkuun innovaatioympäristö, jossa laserpuhdistusta voitiin kehittää ja testata realistisesti. Ympäristö sisälsi muun muassa kannettavan laserin, suojaverhot, pyrometrit ja pölynkeräyksen. Hankkeen työpajat ja webinaarit edistivät osaamista, turvallisuutta ja monialaista yhteistyötä keskeisen teknologian kehittämiseksi.

6. Työpaketti 5: Kustannusanalyysi eri teknologioista/niiden käyttöönotosta sekä analyysi uusien teknologioiden optimaalisesta integraatiosta tiedonsiirron näkökulmasta

Työpaketin 5 selvitystyöstä ja saaduista tuloksista on koostettu erillinen raportti, joten niistä esitetään tässä yhteydessä vain kooste.

Tavoite

Työpaketin 5 ”Kustannusanalyysi eri teknologioista/niiden käyttöönotosta sekä analyysi uusien teknologioiden optimaalisesta integraatiosta tiedonsiirron näkökulmasta” tavoitteena oli kustannuslaskentaa apuna käyttäen tunnistaa ja valikoida laserteknologian käyttöön liittyvät olennaiset kulut, kuten investointi- ja käyttökustannukset, sekä löytää kokonaistaloudellisesti edullisin vaihtoehto laivanrakennuksen sekä pakkausteollisuuden kontekstiin.

Tavoitteena oli myös selvittää ja analysoida uuden teknologian integrointia yrityksen prosesseihin ja digitaalisten muutosten hyödyntämistä niissä. Aihetta tarkasteltiin niin meriteollisuuden kuin pakkausteollisuudenkin kohdalla.

Tulokset

Uusien teknologioiden integraatioon ja prosessin digitalisointiin liittyy yrityksissä usein haasteita. Uusia investointeja punnitaan tarkkaan eri näkökulmista käsin ja investointilaskelmia käytetään arvioimaan kannattavuutta. Laserteknologiaa hyödyntävät sovelluskohteet ovat luonteeltaan hyvin erilaisia ja laserteknologian investoinnin vaikutuksiin ja kannattavuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten käyttökohteen materiaali, laitteen käyttöaste ja tehot sekä investoidaanko lisäksi automaatioon ja robotiikkaan. Muun muassa näiden kysymysten ratkaisua tukemaan luotiin viitekehys laserpuhdistuksen kustannuksista ja investoinnin kannattavuuden laskentamalli. Viitekehys/laskentamalli tukee yrityksiä laserpuhdistuksesta aiheutuvien kustannusten arvioimisessa aina hankinnasta romutukseen tai kierrätykseen asti sekä kannattavuuden laskemisessa. Viitekehystä voi mahdollisesti hyödyntää muissakin lasertekniikan sovelluskohteissa hieman mukautettuna.

Työpaketissa selvitettiin lisäksi ns. nettovaikutusmenetelmän soveltamista yksittäisen uuden valmistustekniikan käyttöön. Tässä tarkasteltiin molempien, perinteisen hiekkapuhallusmenetelmän ja laserteknologian vaikutuksia ja verrattiin niitä keskenään saatujen arvotusten avulla. Nettovaikutusanalyysissä käytettiin Upright Projectin kehittämää nettovaikutusmallia, joka hyödyntää tieteellistä tietoa, julkista dataa ja kieliteknologiaa. Menetelmän avulla voi arvioida kvantitatiivisen tarkastelun kautta positiivisia ja negatiivisia vaikutuksia neljässä ulottuvuudessa (ympäristö, terveys, yhteiskunta ja tieto). Menetelmää voi soveltaa eri konteksteihin, kuten toimialoille, yrityksille ja teknologioille. MALAMA-hankkeessa menetelmää hyödynnettiin arvioimaan ja vertaamaan hiekkapuhallusmenetelmän ja laserteknologian vaikutusten eroja erilaisilla mittareilla, kuten tehokkuudella, laadunhallinnalla, turvallisuudella, sääntelyllä, innovaatiopotentialilla sekä ympäristö-, taloudellisilla ja yhteiskunnallisilla vaikutuksilla.

Upright-menetelmän arviointikriteerien pohjalta laserpuhdistus näyttäytyi positiivisempänä teknologiana kuin hiekkapuhallus. Arvioinnissa laserpuhdistus sai kuusi positiivista pistettä ja kaksi neutraalia tai

tasapainoista arviota. Teknologia tukee ympäristön kestävyttä, parantaa työturvallisuutta ja on suotuisa menetelmä digitalisaation sekä laadunhallinnan osalta. Hiekkapuhallus sai puolestaan kaksi positiivista ja kuusi negatiivista pistettä. Tulosten perusteella hiekkapuhallusmenetelmä aiheuttaa enemmän haittaa esimerkiksi ympäristölle, terveydelle ja turvallisuudelle.

Laserteknologialla nähdään mahdollisuuksia pinnan puhdistusprosesseissa tulevaisuudessa. Erilaiset viitekehukset, laskentamallit ja vastuullisuuden arviointimenetelmät toimivat yritysten apuna uusien teknologioiden investointipäätöksiä punnitessa.

Tarkempi kuvaus työpaketin 5 tuloksista löytyy raportista:

Aro, E. & Kamboj, N. (2025). Laserteknologian investoinnin arviointi – Laserpuhdistus meriteollisuudessa ja lasermerkkaus pakkausteollisuudessa. MALAMA-hankkeen raportti.

Lisätietoa Upright Projectin nettovaikutusmenetelmästä:

Turunen, J. (2021). Exploring the corporate financial and social performance relationship with net impact method.

The Upright Project. (2021). Net Impact Report 2021. Upright Project. <https://netimpactreport.com/>

Hämäläinen, M., & The Upright Project Team. (2020). Measuring the net impact of companies: A data-driven model for holistic sustainability assessment. Upright Project. <https://www.uprightproject.com>

The Upright Project. (2023). The Upright methodology: Quantifying holistic value creation. Upright Project. https://www.kemijoki.fi/media/liitteet/upright-project/upright_methodology.pdf

7. Työpaketti 6: Viestintä ja tulosten levittäminen

Yleistä

Kun MALAMA-hanke alkoi keväällä 2023, oli jo siinä vaiheessa taustalla hyvä joukko erityisesti Satakunnan alueen meriteollisuuden ja pakkausteollisuuden yrityksiä vaikuttamassa hankkeen toteuttamiseen mahdollisimman käytäntöä hyödyttävällä tavalla. Yhteistyö vahvistui järjestettyjen ideointityöpajojen ja sprinttien eli nopeiden kokeilujen myötä. Matkan varrella mm. saadessamme mahdollisuuden laajentaa hankkeen maantieteellistä aluetta, mukaan tuli lisää kiinnostuneita yrityksiä ja muita organisaatioita hankkeen järjestämiin tapahtumiin, laserdemonstraatioihin ja yrityshaastatteluihin niin, että koossa oli monenlaisia ideoita testattaviksi uusina tutkimus- ja käyttökohteina sekä hyvä pohja taloudellisille ja ympäristöllisille analyyseille. Yritykset ovat lisäksi demonstroineet lasertekniikan ja -laitteiden käyttöä telakkahallissa Raumalla.

Tämä oli hyvä pohja rakentaa kehittämishanketta. Se tarvitsi juuri tuollaista yritysten aktiivista ja kiinnostunutta mukanaoloa ja avointa keskustelua. Tilaisuuksien ja keskustelujen avulla hankkeeseen saatiin tärkeää käytännön näkökulmaa ja kokemuksia mutta myös mahdollisuus viestiä hankkeesta laajemmin. Hankkeen toteuttamisissa työpajoissa, webinaareissa, sprinteissä, demonstraatioissa, seminaareissa ja yrityshaastatelussa kohdattiin neljäkymmentä laivanrakennuksen ja pakkausteollisuuden asiantuntijaa.

Tulosten levittäminen

Hankkeelle perustettiin sen alkaessa oma verkkosivusto <https://sites.utu.fi/malama/>, jonka välityksellä kerrottiin hankkeesta, markkinoitiin hanketapahtumia, raportoitiin hankkeen saavutuksista ja toteutuksesta blogijuttujen ja -artikkeleiden avulla sekä julkaistiin hankkeen tilaisuuksien esitysmateriaaleja, videotallenteita ja hankkeen tuloksia.

Hankkeen tapahtumista ja uutisoinnista viestittiin verkkosivuston lisäksi Kone- ja materiaalitekniikan laitoksen LinkedIn-tilillä sekä hankkeen aikana perustetulla TSE Porin LinkedIn-tilillä, joista myös ohjattiin kiinnostuneet kävijät hankkeen verkkosivuille. Hanke oli esillä vuosien 2023 ja 2024 marraskuussa järjestetyillä Rauman Meriverkostopäivillä ja Merimessuilla, jossa sillä oli yhteispiste Turun yliopiston kauppakorkeakoulun muitten merihankkeiden kanssa. Hanke sai julkisuutta myös EAKR-rahoitteisen Merimerkit-hankkeen LinkedIn-tilillä ja sen julkaisemissa uutiskirjeissä sekä Porissa järjestetyillä vuoden 2024 TiedeAreena -messuilla.

MALAMA-hankkeen tulokset -raportti sekä tuloksista kertova videotallenne ovat julkisesti esillä ja kaikkien saatavilla hankkeen verkkosivuilla.

Hankkeeseen pohjautuvat opinnäytetyöt sekä vertaisarvioidut tieteelliset julkaisut

2025

Effect of Laser Cleaning on EH36 Steel Surface Quality in Maritime Industry Applications

Laserpuhdistuksen vaikutusta epoksimaalilla pinnoitettuihin EH36-teräslevyihin tutkittiin meriteollisuuden tarpeita silmällä pitäen. Testien perusteella maalikerrokset saatiin poistettua tehokkaasti ilman, että

pohjamateriaali vaurioitui, ja puhdistetut pinnat soveltuvat suoraan uudelleenmaalaukseen ilman hiekkapuhallusta.

Tourunen, E., Väisänen, I., Iizuka, O., Peuronen, A., Kamboj, N., Piili, H., Salminen, A. (2025) Effect of Laser Cleaning on EH36 Steel Surface Quality in Maritime Industry Applications, Conference: 20th Nordic Laser Materials Processing Conference 26–28 August 2025, Kongens Lyngby, Denmark, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1332. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1332/1/012020/pdf> . JUFO 1.

Effects of Laser Polishing on Surface Roughness and Corrosion Properties on Laser Welds as Post-Treatment

Laivarakenteissa käytettävät materiaalit altistuvat jatkuvasti suolavedelle, mikä aiheuttaa korroosiota erityisesti hitsauskohdissa. Tässä tutkimuksessa laserkiillotuksella saatiin hitsisaumat tasaisemmiksi ja korroosionkestävyys parani merkittävästi, mikä voi pidentää rakenteiden käyttöikää ja vähentää huoltotarvetta.

Väisänen, I., Tourunen, E., Tarson, K., Kamboj, N., Piili, H., Salminen, A. (2025) Effects of Laser Polishing on Surface Roughness and Corrosion Properties on Laser Welds as Post-Treatment, Conference: 20th Nordic Laser Materials Processing Conference 26–28 August 2025, Kongens Lyngby, Denmark, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1332, Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1332/1/012018/pdf> . JUFO 1.

2024

Olomuodonmuutokset laserpuhdistuksessa

Tässä tutkielmassa selvitetään, miten lasersäde poistaa maalipinnoitteita eri materiaaleilta ja mitä fysikaalisia ilmiöitä, kuten olomuodonmuutoksia, prosessin aikana tapahtuu. Näiden ilmiöiden ymmärtäminen auttaa parantamaan puhdistuksen tehokkuutta ja laatua eri teollisissa sovelluksissa.

Tourunen, E. (2024) Olomuodonmuutokset laserpuhdistuksessa. Bachelor Thesis, University of Turku, 23 p. , available: https://www.utu-pub.fi/bitstream/handle/10024/176449/Tourunen_Eter_opinnayte.pdf?sequence=1&isAllowed=y

8. MALAMA investointihanke: laserpuhdistusinnovaatioympäristön luominen

MALAMA-laserpuhdistusinnovaatioympäristö

MALAMA-investointihankkeen keskeisenä tavoitteena oli rakentaa laserpuhdistusteknologian ympärille monipuolinen ja siirrettävä innovaatioympäristö, joka tukee uusien ratkaisujen kehittämistä, testaamista ja kaupallistamista. Hankkeessa pyrittiin luomaan ekosysteemi, jossa yritykset, tutkimuslaitokset, julkinen sektori ja loppukäyttäjät voivat yhdessä kehittää teknologisia ratkaisuja, jakaa osaamista ja edistää kestävä teollista kehitystä.

Laserpuhdistuksen osalta painopiste oli erityisesti kehittyvien lasertekniikoiden kehittämisessä ja pilotoinnissa. Tavoitteena oli luoda realistinen ja turvallinen testialusta, jossa menetelmää voidaan kehittää käytännön tarpeita vastaavaksi. Tätä varten rakennettiin räätälöity laserpuhdistussolu, joka jäljitteli telakoiden olosuhteita mahdollisimman tarkasti. Solussa käytettiin siirrettäviä suojaverhoja ja rakenteita, jotka mahdollistivat joustavan työskentelyn erilaisissa kohteissa. Tämä mahdollisti menetelmän testaamisen aidossa käyttöympäristössä, mikä oli tärkeää sen validoinnin ja jatkokehityksen kannalta.

Innovaatioympäristön ytimessä oli kannettava pulssilaserpuhdistuslaite, joka soveltui erityisesti meriteollisuudessa käytettävien EH36-meriterästen puhdistamiseen. Laitteen siirrettävyys ja tehokkuus tekivät siitä erinomaisen työkalun kenttäolosuhteisiin, joissa tarvitaan tarkkaa ja turvallista puhdistusta ilman kemikaleja tai mekaanista kulutusta. Laserpuhdistus tarjoaa ympäristöystävällisen vaihtoehdon perinteisille menetelmille, ja sen soveltuvuus monikerroksisiin pinnoitteisiin tekee siitä erityisen hyödyllisen vaativissa teollisissa kohteissa.

Ympäristön toiminnallisuutta tukivat useat tekniset ratkaisut, joista keskeisimpiä olivat anturointijärjestelmät. Innovaatioympäristöön sisällytettiin kaksi pyrometriä (AST A150 ja AST A250), joiden avulla voitiin seurata materiaalin lämpötilaa reaaliaikaisesti laajalla mitta-alueella (75–3000 °C). Tämä lämpötiladata oli olennainen prosessin hallinnan, materiaalien käyttäytymisen ymmärtämisen ja laadunvarmistuksen kannalta. Tarkka lämpötilan seuranta mahdollisti lasersäteiden parametrien säätämisen optimaalisiksi eri materiaalien ja pinnoitteiden mukaan.

Lisäksi ympäristöön kuului pölyn- ja jätteenkeräysjärjestelmä, joka edisti puhdasta ja turvallista työskentelyä. Työskentelyolosuhteiden hallinta on erityisen tärkeää laserpuhdistuksessa, sillä prosessissa syntyy hienojakoista pölyä ja mahdollisesti haitallisia hiukkasia. Keräysjärjestelmä varmistaa, että puhdistus voidaan toteuttaa turvallisesti myös suljetuissa tai herkissä tiloissa. Visuaalista dokumentointia varten ympäristöön lisättiin DSLR-kamera, jolla puhdistustulokset voitiin tallentaa ja analysoida. Kuvamateriaali tukee menetelmän kehitystä ja tarjoaa arvokasta tietoa prosessin tehokkuudesta ja laadusta.

Yhteistyö eri toimijoiden välillä oli ratkaisevassa roolissa innovaatioympäristön kehittämisessä. Yritykset toivat mukanaan käytännön tarpeita ja sovellusympäristöjä, tutkimuslaitokset tarjosivat teknistä asiantuntemusta ja menetelmäkehitystä, ja julkinen sektori sekä rahoittaja mahdollistivat hankkeen toteutuksen ja jatkuvuuden. Käyttäjörganisaatioiden palaute prototyypeistä oli erityisen arvokasta, sillä se auttoi suuntaamaan kehitystyötä todellisiin tarpeisiin ja parantamaan menetelmän käytettävyyttä.

Kehitystyön mahdollistaja

Kokonaisuudessaan MALAMA-hankkeessa kehitetty laserpuhdistuksen innovaatioympäristö tarjoaa joustavan, turvallisen ja tehokkaan alustan uuden teknologian kehittämiseksi, pilotoinnille ja käyttöönotolle. Laserpuhdistusteknologian kehittämiseen liittyvä innovaatioympäristö ei ole vain tekninen alusta – se on myös strateginen investointi suomalaisen teollisuuden kilpailukykyyn. Suomessa laserpuhdistus tunnetaan vielä melko vähän, ja menetelmän potentiaali on suurelta osin hyödyntämättä. Tämä tekee kehitystyöstä erityisen tärkeää, sillä teknologian varhainen omaksuminen voi tarjota suomalaisille yrityksille merkittävää etumatkaa kansainvälisillä markkinoilla.

Yksi suurimmista haasteista uusien teknologioiden käyttöönotossa on tiedonsiirto eri toimijoiden välillä. Tutkimuslaitoksilla on usein syvällistä teknistä osaamista ja kykyä kehittää uusia menetelmiä, mutta teollisuudessa tarvitaan käytännön sovelluksia, jotka toimivat tehokkaasti ja turvallisesti arjen tuotantoympäristöissä. Innovaatioympäristö toimii sillanrakentajana näiden maailmojen välillä. Se tarjoaa paikan, jossa kehittämisen aikana syntyneet tulokset voidaan testata, validoida ja muuntaa toimiviksi ratkaisuihin yhdessä käyttäjien kanssa.

Tällainen yhteistyö on erityisen tärkeää Suomessa, jossa teollisuuden rakenne on monimuotoinen ja pk-yrityksillä on rajalliset resurssit investoida omaan kehittämis- ja kehitystoimintaan. Kun teknologiaa kehitetään yhteisessä ympäristössä, pienemmätkin toimijat voivat osallistua ja hyötyä uusista ratkaisuista ilman suuria alkuinvestointeja. Tämä tukee koko alan uudistumista ja vahvistaa kansallista osaamis pohjaa.

Turvallisuus on toinen keskeinen näkökulma laserpuhdistuksen kehityksessä. Lasertekniikka sisältää riskejä, jotka liittyvät muun muassa säteilyyn, lämpöön ja pölyhiukkasiin. Innovaatioympäristössä turvallisuus on otettu huomioon kokonaisvaltaisesti: suojaverhot, anturointi, pölynkeräys ja lämpötilan seuranta muodostavat järjestelmän, joka mahdollistaa turvallisen työskentelyn myös vaativissa olosuhteissa. Tämä ei ainoastaan suojaa työntekijöitä, vaan myös lisää luottamusta menetelmän käyttöön teollisuudessa.

Suomen kilpailukykyyn kannalta on tärkeää, että tällaisia teknologioita ei vain kehitetä, vaan myös otetaan käyttöön laajasti. Innovaatioympäristön kaltaiset kehitysalustat mahdollistavat sen, että tieto ei jää yksittäisten hankkeiden sisälle, vaan leviää laajemmin teollisuuteen, koulutukseen ja julkisiin palveluihin. Kun osaaminen kasvaa ja teknologia vakiintuu, syntyy uusia liiketoimintamahdollisuuksia, vientituotteita ja työpaikkoja.

Yhteenvetona voidaan todeta, että laserpuhdistuksen innovaatioympäristö ei ole vain tekninen ratkaisu – se on osa laajempaa ekosysteemiä, joka tukee tiedon jakamista, osaamisen kasvua ja kestävästä teollisesta kehityksestä Suomessa. Sen avulla voidaan rakentaa siltoja tutkimuksen ja kehittämisen sekä käytännön välille, vahvistaa turvallisuutta ja edistää suomalaisen teollisuuden uudistumista globaalissa kilpailussa.

9. Yhteenveto

MALAMA-hanketta valmisteltaessa v. 2022 arvioitiin maamme yritysten tietotaidon laserteknologiasta ja sen suomista mahdollisuuksista olevan edistyneellä tasolla, minkä vuoksi nähtiin mahdollisena saada enenevässä määrin teknologia digitaalisena ja ympäristöystävällisenä menetelmänä niin meri- kuin pakkausteollisuudenkin laajempaan käyttöön. Hankkeen kehittämistoimien avulla haluttiin edistää teknologian käyttöönottoa mm. perinteisiä hiekka- ja raepuhallusmenetelmiä ympäristöystävällisempänä vaihtoehtona. Hankkeen alkaessa ja edetessä kävi kuitenkin nopeasti ilmi, ettei lasertekniikkaa oikeastaan käytetty laivanrakennusteollisuuden pintojen esikäsittelymenetelmänä. Pääasiallisena syynä tähän nähtiin tyypillisten pintojen suuri koko ja perinteisten puhdistusmenetelmien tehokkuus ja nopeus pintojen puhdistuksessa sekä niiden puhdistustulokselle asetetut standardit. Luonnollisesti tehokkaiden laserlaitteiden korkeampi hintakin painoi vaa'assa. Hankkeessa on uusia käyttökohdeideoita tutkittu ja testattu, mutta niiden skaalaaminen esim. meriteollisuuden tarpeisiin vaatii vielä aikaa. Näistä syistä johtuen ei vielä hankkeen aikana ole näkyvissä laserteknologian käyttöönottoa teollisuuden prosesseihin MALAMA-hankkeen kontekstissa. Toisin sanoen yrityksillä ei ole vielä uskallusta investoida uuteen tuotantoprosessiin ja rekrytoida pysyvää työvoimaa siihen.

Yhteistyö tutkimusekosysteemien ja yritysten kanssa laserpuhdistusteknologian kehittämisessä

MALAMA-hankkeen laserpuhdistusteknologian kehitys perustui tiiviiseen yhteistyöhön teollisuusyritysten ja tutkimusorganisaatioiden kanssa. Työpaketissa 1 yrityskontaktointit ja työpajat käynnistivät vuoropuhelun yritysten kanssa, kartoittaen tarpeita ja sovelluskohteita. Sprintit, kuten Turun konetekniikan laboratorion ja Rauman telakan kokeilujaksot, mahdollistivat teknologian testaamisen käytännössä. Yritykset toimittivat materiaaleja ja osallistuivat arviointiin, mikä vahvisti menetelmän soveltuvuutta teollisiin olosuhteisiin.

Työpaketissa 3 keskityttiin tietoisuuden lisäämiseen ja turvallisuuskäytäntöihin. Laserturvallisuustyöpaja ja "Precision and Power" -webinaari tarjosivat osallistujille käytännön tietoa ja asiantuntijanäkemyksiä. Tilaisuudet osoittivat, että vaikka kiinnostus teknologiaan oli suurta, osaamisen taso ja turvallisuuskäytännöt vaihtelivat, mikä korosti koulutuksen ja ohjeistuksen tarvetta.

Työpaketissa 4 Rauman telakalla toteutettu sprintti konkretisoi yhteistyön tulokset. Kolme yritystä esitteli laserpuhdistusratkaisujaan ja suoritti demonstraatioita telakan näytekappaleilla. Testit osoittivat menetelmän tehokkuuden ja soveltuvuuden telakkateollisuuteen.

Hankkeen aikana rakennettiin avoin ekosysteemi, jossa tieto kulki eri toimijoiden välillä. Käyttäjäorganisaatioiden palaute, tutkimuslaitosten asiantuntemus ja yritysten käytännön kokemus yhdistyivät mahdollistaen laserpuhdistusteknologian kehittämisen, validoinnin ja kaupallistamisen kestäväen teollisuuden tarpeisiin.

MALAMA-hankkeen kirjallisuuteen, yrityshaastatteluihin sekä laboratorio- ja telakkahallissa tehtyihin testeihin perustuvien eri puhdistusmenetelmien vertailujen avulla saatiin runsaasti lisätietoa perinteisten puhdistusmenetelmien ja uudempaan teknologiaan perustuvan lasertekniikan ominaisuuksista ja nykytilasta.

Yrityksiä hyödyttävät uudet arviointimenetelmät

Työpaketissa 2 verrattiin SWOT- eli nelikenttään perustuvan analyysin kautta hiekka- ja raepuhallusmenetelmiin ja laserpuhdistukseen liittyviä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia. Vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat jaoteltiin edelleen aineistosta nousseiden eri teemojen alle. Analyysin myötä yritykset voivat tarkastella laajasti menetelmiä eri näkökulmista käsin, kuten niiden käyttökelpoisuuden, kustannusten, tehokkuuden, laadunhallinnan, ympäristötekijöiden, henkilöstöltä vaadittavan osaamisen, terveysvaikutusten ja ergonomisten tekijöiden, turvallisuustekijöiden, sääntelyn, standardien ja asiakasvaatimusten sekä innovaation, digitalisaation ja uusien toimintatapojen kautta. Lisäksi projektissa tehdyn työn pohjalta tunnistettiin kvantitatiivisia ja kvalitatiivisia mittareita, joita yritykset voivat tarpeen mukaan hyödyntää omassa arviointityössään, kun ne vertaavat esimerkiksi hiekka- ja raepuhallusmenetelmää sekä laserpuhdistusteknologiaa toisiinsa.

On todennäköistä, että laserteknologian käyttö tulee jatkossa kasvamaan yrityksissä. Erilaiset viitekehukset, laskentamallit ja uudet arviointimenetelmät ovat apuna, kun yritykset tekevät päätöksiä teknologioiden investoinneista. Työpaketissa 5 luotiin yritysten tueksi viitekehys laserteknologian kustannuksista sekä malli investoinnin kannattavuuden laskemiseen. Investointien kohdalla on tärkeää huomioida, että aina pelkät yksittäiset taloudelliset analyysit ja arviot eivät ole riittäviä, vaan on tarpeen arvioida investoinnin kokonaisvaikutuksia. Työpaketissa 5 esiteltiin lisäksi nettovaikutusmenetelmä, jota voi hyödyntää eri teknologioiden kestävyys- ja vastuullisuuden arvioinnissa laajemmin. Menetelmän pohjalta esitettiin vertailevia tuloksia hiekkapuhallusmenetelmän ja laserpuhdistuksen nettovaikutuksista.

Laserpuhdistustestien konkreettiset tulokset ja niiden hyödyntäminen jatkossa

MALAMA-hankkeen testit tuottivat merkittäviä ja konkreettisia tuloksia laserpuhdistuksen soveltuvuudesta eri teollisiin käyttökohteisiin. Lasermerkinnän osalta saatiin aikaan tarkkoja ja pysyviä merkintöjä kartongille, muoville ja metallille ilman lisäkemikaaleja, mikä tukee kierrätettävien pakkausratkaisujen kehittämistä. Laserkuvioinnilla luotiin mikrorakenteita, jotka mahdollistavat hydrofobisten ja hydrofiilisten pintojen valmistuksen ilman kemiallisia aineita – soveltuen esimerkiksi biosensoreihin ja lääketieteellisiin laitteisiin.

Käsitönteollisen laserpuhdistuslaitteen testit osoittivat sen soveltuvan erityisesti vaikeasti saavutettaviin ja tarkkuutta vaativiin kohteisiin. Vaikka laite vaatii käyttäjältä osaamista ja huolellisuutta, sen joustavuus ja tarkkuus tekevät siitä potentiaalisen ratkaisun monimuotoisiin puhdistustehtäviin. Turvallisuuskäsitteelliset näkökulmat nousivat esiin, ja testien perusteella kehitettiin suosituksia suojavarusteista ja koulutustarpeista.

Pintojen esivalmistelussa laserpuhdistus osoittautui tehokkaaksi menetelmäksi, joka paransi pintojen puhtautta ja karheutta ennen maalausta tai liittämistä. Monimateriaaliliitoksissa laserpuhdistus paransi liitospintojen laatua ja vähensi virheriskiä. Simuloidussa teollisessa ympäristössä laserpuhdistus toimi luotettavasti, ja testit osoittivat menetelmän soveltuvan erityisesti meriteollisuuteen.

Tulokset tukevat laserpuhdistuksen jatkokehitystä kohti laajempaa teollista käyttöönottoa. Ne tarjoavat pohjan menetelmän standardoinnille, koulutukselle ja integroinnille osaksi tuotantoprosesseja. Laserpuhdistus voi jatkossa parantaa tuotannon laatua, vähentää ympäristökuormitusta ja lisätä energiatehokkuutta eri teollisuudenaloilla.

Uraauurtavat monitorointikeinot, tutkimusdata ja innovaatioympäristö laserpuhdistuksen kehittämisessä

MALAMA-hankkeessa kehitettiin ja testattiin useita edistyskellisiä menetelmiä laserpuhdistuksen arviointiin ja kehittämiseen, jotka loivat pohjan uusille tutkimusavauksille ja teollisille sovelluksille. Uraauurtavat monitorointikeinot, kuten Cavitarin laserkuvantamisanurit ja Xarionin akustiset emissioanturit, mahdollistivat puhdistusprosessin reaaliaikaisen seurannan ilman fyysistä kontaktia. Näiden avulla voitiin havaita prosessin eteneminen, poikkeamat ja varmistaa materiaalin eheys. Spektrometri ja pyrometri täydensivät mittauksia säteily- ja lämpötiladatan osalta, tarjoten kokonaisvaltaisen näkymän prosessin hallintaan.

Tutkimusdataa kerättiin systemaattisesti eri materiaaleista, kuten kromilevyistä, lasipinnoista ja ruostumattomasta teräksestä. Data sisälsi muun muassa pintakarheusmittauksia, topografiakuvantamista ja röntgendiffraktiotuloksia, joiden avulla voitiin arvioida puhdistuksen laatu ja vaikutukset materiaalin rakenteeseen. Tulokset osoittivat, että laserpuhdistus on tehokas, tarkka ja ympäristöystävällinen menetelmä, joka soveltuu monipuolisesti teollisiin käyttökohteisiin.

Innovaatioympäristö rakennettiin Quad Tech Turkuun, jossa laserpuhdistusta voitiin testata realistisesti simuloituissa teollisissa olosuhteissa. Ympäristö mahdollisti uusien menetelmien kehittämisen, pilotoinnin ja kaupallistamisen yhteistyössä tutkimuslaitosten, yritysten ja julkisen sektorin kanssa.

Testitulokset ja kehitystyö synnyttivät uusia hankeideoita, jotka tähtäävät laserpuhdistuksen laajempaan käyttöönottoon esimerkiksi meriteollisuudessa, pakkausalalla ja monimateriaaliliitoksissa. MALAMA-hanke loi vahvan perustan tulevaisuuden kestäväälle pintakäsittelyteknologialle.

Lopuksi

Laserteknologian nykyisestä käytön laajuudesta riippumatta ovat MALAMA-hankkeen tulokset moninaisia ja kehitystä eteenpäin vieviä. Onnistumisena voidaan nähdä jo se, että hankkeen toimenpiteisiin saatiin mukaan lähes 40 laivanrakennusteollisuuden ja pakkausteollisuuden yritystä ja alojen sidosryhmiä. Näitä käytännön toimijoita tarvittiin aivan alkumetreiltä asti. Ensin heillä oli keskeinen rooli ideoida mahdollisia kehittämiskohteita laserteknologian käytön lisäämiseksi, sitten he toimittivat erilaisia meriteollisuuden käyttämiä materiaaleja laserpuhdistuskokeisiin ja pakkausteollisuuden materiaaleja lasermerkkaamisen testaamiseksi, demonstroivat työstöä teollisuuden kohteilla, todensivat ja arvioivat laboratorio-oloissa ja telakkahallissa tehtyjen lasertyöstöjen käytännön potentiaalia, jakoivat kokemuksiaan ja ajatuksiaan niin hiekka- ja raepuhallusmenetelmistä kuin laserteknologiastakin yrityshaastatteluissa sekä lopuksi vielä toivat käytännön näkökulmaa hankkeessa tehtyihin lasertesteihin ja niitä seuranneisiin analyysihin.

Konkreettinen hankkeen inspiroima tulos, on Rauma Marine Constructions Oy:n päätös kokeilla laserpuhdistusta uudisrakennuksen nostettavien autokansien päätyläppien siistimiseen. Projektipäällikkö Markku Uusitalo kertoi tästä MALAMAN päätösseminaarissa 20.5.2025. Hänen mukaansa perinteinen puhdistus olisi tarkoittanut esim. soodapuhalluksen käyttöä, mutta siitä olisi kumiseen läppään jäänyt jälkiä. Kokeilu onnistui ja laserpuhdistus soveltui kohteeseen hyvin. Hän oli lisäksi miettinyt joukon muita potentiaalisia laserpuhdistuskohteita: esimerkiksi ikkunoiden tiivistepintojen tai korjattujen rakenteiden, kuten kulmien, puhdistaminen maalausta varten.

MALAMA-hankkeen aikana tietoa laserpuhdistuksen mahdollisuuksista ja hyödyistä tuotiin laajasti esille yrityksille eri tavoin kuten haastatteluiden, työpajojen ja muiden tilaisuuksien kautta. Hankkeen

yhteistyöyritykset näkivät laserteknologialla mahdollisuuksia laivanrakennusteollisuudessa. Ehkei vielä sen suurten pintojen käsittelyssä, mutta pienempien, tarkkuutta vaativien kohteiden puhdistuksessa. Samoin lasertekniikan katsottiin sopivan mm. pölynaroille kohteille. Vielä kuitenkin suhteellisen kallis alkuinvestointi laserlaitteistoon jarruttaa puhdistustoimijoita sellaisen hankinnassa omiin prosesseihinsa. Puntarissa ovat luonnollisesti hankinnasta tai käytöstä koituvat hyödyt ja mahdolliset haitatkin, kuten hankintakustannukset, puhdistusjäljen kelpaaminen asiakkaille, mahdollisen investoinnin käyttöaste tai vaikkapa vaikutukset yrityksen imagoon. Yritykset halusivat myös seurata vielä mm. ympäristöön liittyvän sääntelyn kehittymistä.

Hankkeen toteuttamisen aikana tuli selkeästi esiin, miten tietoisuus laserlaitteiden turvallisuuskäytännöistä vaatii vielä selvitys- ja koulutustyötä. Maahamme pitää saada luotettavat ja oikeelliset turvallisuusohjeet laserlaitteiston käyttöön ja myös yrityksille.